

UNIVERSITE DE LIEGE
Faculté des Sciences
Département de Sciences et Gestion de l'environnement
Building Energy Monitoring and Simulation

**INFLUENCE DE LA FENESTRATION EN VITRE SUR LE CONFORT
THERMIQUE DES BATIMENTS EN CLIMAT TROPICAL ET
HUMIDE : CAS DE LA BANDE COTIERE DU BENIN**



Dissertation présentée par

OLISSAN Olagoké Aurélien

En vue de l'obtention du grade de **Docteur en Sciences**

Soutenue le : 13 Juillet 2017

devant le jury composé de :

Professeur Jean-Marie HAUGLUSTAIN	(Président)
Professeur Philippe ANDRE	(Promoteur)
Professeur Clément KOUCHADE	(co - Promoteur)
Professeur Yézouma COULIBALY	(Secrétaire)
Professeur Cossi Norbert AWANOU	(Lecteur)
Professeur Riad BENELMIR	(Lecteur)

Copyright©. Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994, sur le droit d’auteur et les droits voisins, seul l’auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque façon ou de quelque forme que ce soit ou d’en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous une autre forme est donc faite en violation de la dite loi et des modifications ultérieures

Dédicaces

A tous ceux qui me sont chers

Olagoké Aurélien OLISSAN

Remerciements

Comme on le dit souvent “En toute chose, il faut considérer la fin”. Il ne m’était pas tout évident d’aller au bout de ces travaux, ma formation de base étant toute différente de celle d’un thermicien, énergétique du bâtiment. Je ne peux que remercier tous ceux qui m’ont accompagné dans cette aventure périlleuse à la quête de ce diplôme que trouverait – on d’inopportun, vu le temps qui sépare mon inscription en thèse à l’Université de Liège, de la fin de mes études antérieures à Moscou et à l’Université de Technologie de Compiègne.

Ceci dit, je ne peux m’empêcher d’essuyer mes larmes, et remercier de tout cœur, mon créateur, pour ce don de patience, de courage, de perspicacité, de persévérance et de tempérance tout au long de cette thèse. Ce fut pour moi, une réelle opportunité de développer de nouvelles compétences.

Ensuite, j’aimerais remercier chaleureusement le Professeur Philippe ANDRE qui a été vraiment la cheville ouvrière de cette thèse, pour la confiance et le soutien qu’il m’a accordés en acceptant de diriger ces travaux. Il a su durant ces cinq dernières années de découverte, m’accompagner sur ce chemin qui s’est avéré parfois difficile, et son soutien et remarques m’ont permis d’avancer. Je n’ai éprouvé que du plaisir à travailler à ses côtés.

Cette thèse représente pour moi, cinq années de travail.... Mais aussi bien plus... des milliers de kilomètres parcourus en avion et en train au grand bonheur de l’empreinte écologique des Universités d’Abomey Calavi et de Liège.

Mes remerciements iront aussi à l’endroit des membres de l’équipe du BEMS, à commencer d’abord par les Docteur- Ingénieur **Sébastien Thomas, Julie CARTON, Frédéric FOURRE**, puis les chercheurs comme **Samuel HENNAUT, Fabien CLAUDE, AJAJI Youness, Elisabeth DAVIN, Bertrand FABRY, Pierre-Yves FRANCK, Corinne ROGIEST-LEJEUNE**,

Nicolas PIGNON et Imane REHAB qui en mes tous débuts au sein de l'équipe, m'ont donné les bases du confort thermique dans le bâtiment et l'utilisation du logiciel de simulation numérique TRNSYS sans lesquels, les résultats de ces travaux n'auraient pu voir le jour.

J'exprimerai ici mes remerciements au Recteur Cossi Norbert AWANOU, et aux professeurs Gérard DEGAN, Ezéchiel ALLOBA, KOUNOUEWA Basile de l'Université d'ABOMEY CALAVI, pour m'avoir choisi ce sujet. J'ai découvert à travers celui-ci les délices de la science et de la recherche.

Au Professeur Jean Marie HAUGLUSTAINE, un énorme merci pour avoir accepté de suivre et donner à chaque comité de thèse une appréciation à mi – parcours de mes travaux. Sa contribution pour la partie environnementale de ces travaux a été pour moi une aubaine qui m'a permis de maîtriser quelque peu la démarche environnementale du bâtiment.

Au Professeur Pierre DAUBY de l'Université de Liège et coordonnateur du projet CUD, un énorme merci pour son soutien, ses multiples encouragements et surtout sa contribution en tant que modérateur en tout moment de crise durant cette thèse.

Particulièrement, au Dr Clément KOUCHADE, malgré les liens fraternels entre lui et moi, a su prendre de la hauteur pour avoir un regard critique et scientifique de mes travaux de thèse. Aussi, faudrait-il remarquer que ses arrivées sporadiques à Arlon pour régler avec moi certaines difficultés m'ont mis en confiance. Tout ceci, en plus des remarques des Professeurs Philippe ANDRE et Norbert Cossi AWANOU, m'a permis de mener à bien ces travaux de recherche. Je lui dis ici aussi énorme merci.

Qu'il me soit aussi permis de remercier particulièrement COLLARD Laurent, technicien de l'équipe qui lui aussi m'a apporté un soutien sans faille pour la mise à ma disposition des équipements de mesure qui m'ont été utiles durant la phase du monitoring de mes travaux.

Aux membres du Personnel du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement du Campus d'Arlon, je cite Chantal BARTHOLOME, Catherine HEYMAN, Françoise DASNOY, Christine DASNOY, Lucia GUERMANT, Lisbeth FONTAINE, Roger THILL, Thomas BARTEL, Corinne ANTOINE et Françoise GUILLAUME, je dis : "Un Grand MERCI" pour votre collaboration dans diverses situations.

A mes différentes familles d'adoption et d'accueil en France, je veux citer les familles AMPEAU, SCHARR, VOIRIN et MAREC, une vive reconnaissance pour votre solide soutien durant mes études et mes différents séjours aussi bien à Moscou, Compiègne, Pau et en Belgique.

A Anaïs SCHONS ma compagne, ses parents, ses frères et sœurs, merci pour l'amour que vous ne cessez de me témoigner. Avec vous, je me sens soutenu et protégé. Cette consécration ne pourra que raffermir nos liens.

Au couple DOMINGUEZ, leurs filles Marine et Léa, merci de m'avoir accompagné durant ce séjour de recherche tout en me permettant de découvrir les beautés du SUD-OUEST de la France. Votre soutien et présence à mes côtés ont été pour moi d'une importance capitale dont je ne saurais évaluer ici la grandeur.

A Madame NUGLOZE et sa fille Karen, merci de m'avoir hébergé durant les moments les plus difficiles de mon séjour en Belgique.

A Sabine, la mère de mes filles Alix Claudie, Violaine Irina, malgré la froideur de nos relations, tu as su imprimer une éducation sans faille à nos deux filles. Sois en honorée.

Au feu Pierre AMPEAU et Pierre Joseph – SCHARR, Merci de m'avoir accepté comme un des vôtres. Cette thèse, je vous la dédie. Celle-ci n'est qu'un couronnement de toutes vos entreprises et le fruit de vos efforts pour ma modeste personne. Merci d'avoir été à mes côtés et que l'âme de Pierre AMPEAU repose en paix.

A mes différents amis de la “Maison COM”, je veux citer ici, Edouard et Fanny MIBEYA, TANGOU Thierry, Marius et Christine BESSEKON, Aminata et Djeneba MANE, LIADY Nourou Dine, Dao MOHAMOUDOU, Ibrahim HABIBOU, Claude NTOTO, Didier MBAKI, Guy-Eric KOUAKOU, Patrice BIGOUMANDONDERA, Léonard MINDELE UKONDALEMBA, Alex LINA ALEKE, Gaston NSAVYIMANA, la convivialité, l’ambiance fraternelle et amicale que nous avons toujours partagées ensemble ont véritablement rompu ce qui aurait pu être un véritable “enclavement social”.

A mon feu père Félicien OLISSAN, toi qui as souvent souhaité vivre avec moi ces moments d’intense bonheur, tu n’es plus là pour bénir avec ma chère Maman Thérèse GANDJI épouse OLISSAN, ce travail, ce nouveau départ ! Que ton âme repose en paix.

A mes frères et sœurs Pierre OMONLEGBE, COHOUNCO Marie épouse ABIKOYE, OLISSAN Lié - Claude, Cyprien Clet Darius, Justine Bertille épouse ODOUHARO, Viviane Yolande épouse AGOUYON, Kévin Igor, Edith Nadège Emilie épouse HOUNGBEME et Féliciano Joël, une vive reconnaissance pour votre solide soutien durant toutes mes études.

A mes oncles, cousins et cousines, neveux et nièces, merci de tout cœur pour la chaleur que vous n’avez cessée de me prodiguer durant tout mon séjour en Belgique

Je ne saurais oublier la CUD (Coopération Universitaire Décentralisée) pour son appui financier conséquent durant cette thèse. Merci de m’avoir donné cette opportunité d’étancher cette soif du savoir et cette curiosité de vivre ce qu’est une recherche scientifique!

Aussi dans la même optique une pensée reconnaissante va – t- elle à la boîte d’interim Tempo Team, aux restaurants AC, Faubourg 101 d’Arlon et à tous les collègues de l’Institut Centre Ardenne de Libramont, des Athenées Royales d’Izel, de Vielsalm et de Marche-Bomal.

Enfin, que toutes les personnes qui, de près ou de loin, d'une façon ou d'une autre ont apporté une contribution, petite soit-elle à la réalisation de cette thèse et à l'épanouissement de ma personne, puissent trouver à travers ces lignes, l'expression de mes remerciements les plus sincères.

Résumé

Transparence, confort visuel et esthétique sont les éléments essentiels qui sous-tendent le développement des façades et fenêtres vitrées, bien qu'il soit reconnu que celles-ci soient peu performantes que les façades et fenêtres conventionnelles.

L'implantation à Cotonou, dans la bande côtière du Bénin, des bâtiments entièrement vitrés ou à fenestration en vitres s'est accrue ces dernières années, entraînant une importation effrénée et sans contrôle de verres, alors que le Bénin comme presque tous les pays de l'Afrique subsaharienne, ne disposent d'aucune structure de caractérisation de verre en vue d'en apprécier l'influence sur la performance énergétique des bâtiments dans cette région.

L'objectif de ce travail de thèse est de caractériser les verres les plus utilisés dans le bâtiment au Bénin, et d'en évaluer l'impact sur la performance énergétique des bâtiments dans la bande côtière de cette région.

Cette étude s'est appuyée sur la définition du confort thermique des bâtiments, dans la bande côtière du Bénin et a ainsi permis de porter un regard critique sur la transposition littérale des méthodes d'appréciation de confort thermique des pays du nord dans des régions à climat chaud et humide comme celle de la bande côtière du Bénin. Cependant, une adaptation du modèle de FANGER à cette région de climat chaud et humide, permet de mettre en exergue, une zone de confort commune au climat tempéré des pays du nord et celui de la bande côtière du Bénin, et établit de cette manière, les conditions hygrothermiques de travail, qui favorisent la collaboration entre les occupants de ces bâtiments, dans un souci de convivialité et d'économie d'énergie.

Des séries de mesure ainsi que des simulations thermiques et dynamiques ont été menées afin d'appréhender le comportement thermique d'un bâtiment test entièrement vitré, implanté à Cotonou, ville située dans la bande côtière du Bénin.

Le logiciel TRNSYS a été utilisé pour modéliser le bâtiment test choisi et apprécier la performance énergétique qu'implique l'utilisation de ces vitrages. De nos résultats, il ressort que l'utilisation des vitrages détériore le confort thermique des bâtiments administratifs entièrement vitrés ou à fenestration en vitre dans cette région, et la climatisation active qui entraînerait une dépense d'énergie supplémentaire serait la seule manière d'améliorer ce confort. Dans cet ordre d'idée, pour atteindre une performance énergétique et environnementale de bâtiment à fenestration en vitre dans cette région, le choix des consignes de régulation du climatiseur doit tenir compte du type de vitrage utilisé.

Abstract

High transparency, visual comforts and esthetic quality are the key elements for a high share of glass in modern facades. However highly building glazed fenestration tends to have a lower performance than more traditional fenestration...

The implantation of highly glazed fenestration building in Cotonou, has increased in recent years, resulting unbridled and uncontrolled importation glasses. However, like almost sub-Saharan countries, Benin country has no glass structure characterization, that can appreciate its influence on the energy performance of buildings in this area.

The objective of this work is to characterize most popular used glasses in the building in Benin and to evaluate their impact on the energy performance of buildings in the area.

This study was based on the definition of thermal comfort of buildings in the coastal strip of Benin and has allowed us to have a critical look to the literal transposition methods for assessing thermal comfort in the northern countries to the hot and humid climate regions like the coastal strip of Benin.

However, an adaptation of the FANGER's model to this hot and humid climate region allows to highlight a common comfort zone for the northern countries temperate climate and that of the coastal strip of Benin, and sets the hygrothermal working conditions that foster collaboration between Benin administrative workers, from this region and European expatriates in Cotonou, in the sake of friendliness and energy saving.

Measurement series as well as thermal and dynamic simulations were conducted in order to understand the thermal behavior of a fully glazed test building based in Cotonou, a town in the coastal strip of Benin.

The TRNSYS software was used to model the test building in order to evaluate the performance implications of using these windows.

From our analysis, it appears that the use of glass deteriorates the thermal comfort of highly glazed fenestration buildings in this region, and the active cooling system would be the only way to improve the thermal comfort in this kind of administrative buildings in that region.

In this way, to achieve energy and environmental performance of the glazed fenestration building in this region, the choice of air conditioner set point control parameters should reflect the type of glazing used.

Table des matières	
Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Résumé	viii
Abstract	ix
Table des matières	i
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES ABREVIATIONS	xviii
LISTE DES ANNEXES	xix
PROBLEMATIQUE, OBJECTIFS, DEMARCHE ET PERTINENCE DU SUJET	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CONFORT THERMIQUE DES BATIMENTS EN CLIMATS CHAUDS ET HUMIDES	9
I.1 Introduction	10
I.2 Revue bibliographique du confort thermique en climat chaud et humide	11
I.3 Les paramètres et indices du confort thermique.....	19
I.3.1 Indices de confort	19
I.3.2 Diagrammes de confort	23
I.4 Le confort thermique des bâtiments : Approches Classiques	244
I.4.1 Bilan thermique du corps humain	244
I.4.1.1 Modèle de GAGGE.....	244
I.4.1.2 Modèle de FANGER.....	31
I.5 Forces et Faiblesses de l'approche analytique de FANGER	34
I.6 Approche adaptative du confort thermique des bâtiments.....	36
I.6.1 Les composantes du confort adaptatif	37
I.6.2 Conditions d'utilisation de l'approche adaptative	41
I.6.3 Forces et faiblesses de l'approche adaptative du confort thermique des bâtiments	4242

I.7	Conclusions.....	4344
I.8	Références.....	4444
CHAPITRE 2 : ETUDE DU CONFORT THERMIQUE DANS LES		
BATIMENTS DE LA BANDE COTIERE DU BENIN.....		
II.1	Introduction	46
II.2	Critères de choix des bâtiments tests.....	47
II.3	Présentation du climat de la région côtière du Bénin à travers la température, l'hygrométrie et la vitesse du vent ...	49
II.3.1	La température de l'air.....	502
II.3.2	Le vent	50
II.3.3	Les précipitations	50
II.3.4	L'humidité relative.....	Erreur ! Signet non défini.
II.4	Description de ces bâtiments	52
II.4.1	Bâtiments à baies vitrées.....	52
II.4.2	Bâtiment entièrement vitré.....	Erreur ! Signet non défini.6
II.4.2.1	Rez de chaussée.....	57
II.4.2.2	Etage.....	58
II.5	Application du modèle de FANGER à l'appréciation du confort thermique dans la bande côtière du Bénin	60
II.5.1	Monitoring	60
II.5.2	Les enquêtes	62
II.5.3	Comparaison au Modèle de GIVONI.....	62
II.5.3.1	Modèle mathématique de détermination des indices de confort PMV et PPD.....	6462
II.5.3.2	Algorithme de calcul des indices de confort PMV et PPD.....	66
II.5.3.3	Résultats	6664
II.5.3.4	Interprétations.....	69
II.5.3.5	Prise en compte de la sensation thermique des occupants des bâtiments : Traitement des données	72
II.5.3.6	Comparaison des PMV calculés et ceux mesurés sur le terrain	768
II.5.4	Adaptation du modèle de FANGER à la bande côtière du Bénin....	80

II.5.4.1	Modèle du facteur correctif adaptant le modèle de FANGER à la bande côtière du Bénin	81
II.5.4.2	Application au comportement thermique d'un immeuble entièrement vitré à Cotonou.....	86
II.5.4.3	Interprétation physiologique	90
II.5.4.4	Facteur d'espérance: Calcul du PMV de FANGER étendu à la bande côtière.....	94
II.6	Définition de la zone de confort	97
II.6.1	Méthodologie	97
II.6.2	Résultats	98
II.7	Mise en perspective de l'approche adaptative par rapport à celle de FANGER.....	101
II.7.1	Application de l'approche adaptative pour évaluer le confort thermique des bâtiments dans la bande côtière du Bénin	101
II.7.2	Complémentarité entre l'approche classique de FANGER et l'adaptatif	110
II.8	Conclusions	116
II.9	Références	119
CHAPITRE 3 : VITRAGE DANS LES BATIMENTS		125
III.1	Introduction	126
III.2	Différents types de vitrages existants et mise en œuvre	127
III.2.1	Les principaux vitrages de base couramment utilisés dans le bâtiment	127
III.2.2	Transfert de chaleur à travers une fenêtre vitrée	129
III.2.2.1	La conduction.....	129
III.2.2.2	La convection.....	129
III.2.2.3	Le rayonnement.....	130
III.2.2.4	Les facteurs caractérisant les échanges thermiques au travers d'un vitrage	131
a-	Le facteur solaire g	131
b.	Le coefficient de transmission thermique U.....	132

III.2.2.5 Propriétés des vitrages par rapport au transfert d'énergie et amélioration des performances des vitrages.....	135
a. La réflectivité et vitrages réfléchissants.....	135
b. Emissivité et vitrages à basse émissivité	136
c. Transmissivité.....	137
III.2.3 Les vitrages multiples.....	138
III.2.3.1 Le double vitrage	138
III.2.3.2 Le triple vitrage.....	140
III.2.4. Les vitrage à couches	141
III.2.4.1 Modification de la fonction optique : Vitrage basse émissivité – Vitrage Réfléchissant.....	142
III.2.4.2 Modification de la fonction électrique : Le vitrage électrochrome.....	145
III.3 Etat des recherches sur le vitrage	149
III.4 Cas de l'Afrique et de la bande côtière du Bénin.....	152
III.4.1 Zone de climat chaud et sec.....	154
III.4.2 Zones chaudes et humide (Cas de la bande côtière du Bénin) : Caractérisation des vitrages utilisés dans la bande côtière du Bénin	157
III.4.2.1 Matériels et méthodes	158
III.4.2.2 Résultat des mesures	161
III.5 Conclusion	163
III.6 Références.....	163
CHAPITRE 4. OPTIMISATION DU CHOIX DU VITRAGE	165
IV.1 Introduction	166
IV.2 Impact des vitrages utilisés au Bénin sur le confort thermique du bâtiment test	163
IV.2.1 Zones thermiques du bâtiment.....	167
IV.2.2 Simulations.....	167
IV.2.2.1 Utilisation du modèle de confort validé :.....	168
IV.2.2 Optimisation du choix du vitrage	172
IV.2.3 Conclusions 1	176

IV.3	Amélioration de la performance du vitrage dans les bâtiments administratifs dans la Bande côtière du Bénin.....	176
IV.3.1	Intégration de système d'ombrage	176
IV.3.1.1	Vitrage simple	177
IV.3.1.2	Double vitrage.....	180
IV.3.2	Intégration d'un système du "Night Cooling"	185
IV.3.2.1	Cas du double vitrage	185
IV.3.2.2	Cas du simple vitrage	189
IV.3.3	Utilisation de la ventilation naturelle	189
IV.3.4	Combinaison ombrage et ventilation	190
IV.3.4.1	Simple vitrage 4mm: $V=1.2\text{m/s}$	191
IV.3.4.2	vitrage 4/16/4 $v=1.2\text{m/s}$	191
IV.3.4.3	vitrage 6/12/6 $v=1.2\text{m/s}$	191
IV.3.4.4	vitrage simple 4mm $V=1.5\text{m/s}$	191
IV.3.4.5	Double vitrage 4/16/4 $v=1.5\text{m/s}$	191
IV.3.4.6	vitrage 6/12/6 $V=1.5\text{m/s}$	192
IV.3.5	Combinaison "Nigt Cooling", Ombrage et ventilation	192
IV.3.5.1	Simple vitrage	193
IV.3.5.2	Double vitrage 4/16/4.....	193
IV.3.5.3	Double vitrage 6/12/6.....	193
IV.3.6	Climatisation active	195
IV.3.6.1	Consignes de régulation du climatiseur, éléments de la zone de confort commune au climat tempéré	196
IV.3.6.2	Consignes de régulation du climatiseur, éléments hors de la zone de confort commune au climat tempéré.....	202
IV.4	Pré- outil d'aide à l'optimisation de choix de vitrage des bâtiments administratifs dans la bande côtière du Bénin	207
IV.4.1	Vitrage Double	207
IV.4.2	Simple vitrage	210
IV.5	Conclusion	211

IV.6	Références.....	212
CHAPITRE 5 : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE	214	
V.1	Introduction	215
V.2	Analyse du cycle de vie des vitrages optimaux pour la bande côtière du Bénin	216
V.2.1	Champ de l'étude.....	216
V.2.2	Différentes étapes de fabrication du vitrage simple clair float 4mm.....	217
V.3	Evaluation de l'énergie grise du vitrage du bâtiment : (Consignes de régulation du climatiseur, choisis hors de la zone de confort commune au climat tempéré).....	218
V.3.1	Vitrage simple float clair 4mm.....	218
V.3.2	Double vitrage 4/16/4	222
V.4	Bilan global des émissions de gaz à effet de serre (Consignes de régulation du climatiseur, choisis hors de la zone de confort commune au climat tempéré.....	224
V.4.1	Simple vitrage	224
V.4.2	Double vitrage 4/16/4	225
V.5	Evaluation de l'énergie grise du vitrage du bâtiment et bilan des gaz à effet de serre : (Consignes de régulation du climatiseur, éléments de la zone de confort commune au climat tempéré et au climat de la bande côtière du Bénin	227
V.5.1	Vitrage simple float clair 4mm.....	227
V.5.2	Vitrage double 4/16/4	228
V.6	Conclusions et Recommandations	230
V.7	Références.....	232
Conclusion et perspectives.....	234	
VI.1	Conclusion	235
VI.2	Perspectives	239
ANNEXES.....	241	

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Couverture et demande énergétique au Bénin	2
Figure 2	Taux de consommation d'énergie électrique dans différents secteurs au Bénin	3
Figure 1-1	Variation du PPD en fonction du PMV	34
Figure 2-1	Présentation du climat dans la bande côtière du Bénin	55
Figure 2-2	Bâtiments à baies vitrées (rectorat UAC)	56
Figure 2-3	Bâtiments à baies vitrées (EPAC-UAC)	57
Figure 2-4	Immeuble test (Bâtiment entièrement vitré)	57
Figure 2-5	Plan du rez de chaussée	58
Figure 2-6	Plan de l'étage	60
Figure2-7	Paramètres mesurés en ambiances individuelles	64
Figure2-8	Paramètres mesurés en ambiances individuelles (suite)	65
Figure2-9	Influence de l'humidité sur le PMV	69
Figure2-10	Influence de la température ambiante sur le PMV	70
Figure 2-11	Influence de la température moyenne des parois sur le PMV	70
Figure 2-12	Diagramme de GIVONI	71
Figure 2-13	Echelle du PMV	73
Figure 2-14	Résultat de l'expérience 1	73
Figure 2-15	Résultat de l'expérience 2	74
Figure 2-16	Résultat de l'expérience 3	75
Figure 2-17	Résultat de l'expérience 4	75
Figure 2-18	Résultat de l'expérience 5	76
Figure 2-19	Paramètres mesurés en ambiances naturellement ventilées	78
Figure 2-20	Comparaison entre PMV calculés et PMV mesurés (ambiances climatisées)	80
Figure 2-21	Comparaison entre PMV mesurés et ceux calculés en ambiances naturellement ventilées	80

Figure 2-22	Zone de confort en ambiances climatisées	85
Figure 2-23	Bâtiment test	87
Figure 2-24	Comportement thermique du bâtiment	88
Figure 2-25	Régression linéaire du PMV _{new} en fonction de l'humidité relative	89
Figure 2-26	Zones de confort en ambiances naturellement ventilées	90
Figure 2-27	Sensation thermique des béninois de la bande côtière du Bénin pour des températures et humidités relatives de l'aire basses	97
Figure 2-28	Vote de sensation thermique en fonction du PMV résultant	98
Figure 2-29	Représentation de la zone de confort de FANGER et de celle de la bande côtière du Bénin pour de faibles températures	101
Figure 2-30	Couple (Températures, humidités relatives) confortables aussi bien en climat tempéré que dans la bande côtière du Bénin	101
Figure 2-31	Position de la zone de confort de la bande côtière du Bénin pour des températures élevées par rapport à celle de FANGER	101
Figure 2-32	Analyse du comportement thermique des béninois en fonction de l'humidité relative	102
Figure 2-33	PMV mesuré en fonction de la différence entre la température de confort et celle mesurée en ambiance	105
Figure 2-34	Evolution du confort adaptatif en fonction de la température du confort de FANGER	108
Figure 2-35	Représentation fonctionnelle sous forme de schéma-bloc de la sensation thermique dans une ambiance donnée	111
Figure 2-36	Mise en évidence de l'adaptation dans le schéma-boc du système	112

Figure 2-37	Modèle systémique du mécanisme du confort	113
Figure 2-38	Complémentarité de l'approche adaptative et de celle de FANGER en ambiance climatisée	114
Figure 2-39	Complémentarité de l'approche adaptative et de celle de FANGER en ambiance naturellement ventilée	115
Figure 2-40	Complémentarité de l'approche adaptative et de celle de FANGER en ambiance climatisée et en ambiance naturellement ventilée	116
Figure 2-41		
Figure 3-1	Facteur solaire d'un verre	134
Figure 3-2	Conductivité thermique d'un matériau	135
Figure 3-3	Transmission thermique d'un vitrage	135
Figure 3-4	Evolution du pourcentage du rayonnement solaire réfléchi et transmis en fonction de l'angle d'incidence	138
Figure 3-5	Le double vitrage	141
Figure 3-6	Influence de l'épaisseur du verre sur la valeur de U	142
Figure 3-7	Le triple vitrage	143
Figure 3-8	Application des couches sur les façades du vitrage	145
Figure 3-9	Structure d'un vitrage obturateur	148
Figure 3-10	Principe de fonctionnement d'un vitrage électrochrome	150
Figure 3-11	Technologie de mise en œuvre des vitrages électrochromes	150
Figure 3-12	Structure d'un vitrage électrochrome	153
Figure 3-13	Schéma d'un spectrophotomètre	161
Figure 3-14	Mesure sous l'angle d'incidence normale	162
Figure 3-15	Utilisation d'une sphère intégratrice	162
Figure 3-16	Transmission lumineuse en fonction du facteur solaire	166
Figure 4-1	Evolution des hygrométries	172
Figure 4-2	Evolution des températures	173
Figure 4-3	PMV en fonction de Ta et RH (étage)	174

Figure 4-4	PMV en fonction de Ta et RH (Rez)	174
Figure 4-5	Taux de surchauffe en fonction des caractéristiques thermiques et optiques des différents verres	176
Figure 4-6	Comparaison des PMV des différents vitrages à l'étage	177
Figure 4-7	Comparaison des PMV des différents vitrages au rez	177
Figure 4-8	Comparaison des températures et humidités relatives au rez	180
Figure 4-9	Comparaison des températures et humidités relatives à l'étage	180
Figure 4-10	Comparaison des PMV au rez	181
Figure 4-11	Comparaison des PMV à l'étage	181
Figure 4-12	Test des doubles vitrages	183
Figure 4-13	Comparaison des températures au rez	184
Figure 4-14	Comparaison des températures à l'étage	184
Figure 4-15	Comparaison des humidités relatives au Rez	185
Figure 4-16	Comparaison des humidités relatives à l'étage	185
Figure 4-17	Comparaison des PMV à l'étage	186
Figure 4-18	Comparaison des PMV au Rez	186
Figure 4-19	Evolution de la température à l'étage (double vitrage)	188
Figure 4-20	Evolution de la température au rez (double vitrage)	189
Figure 4-21	Evolution de l'hygrométrie à l'étage	189
Figure 4-22	Evolution de l'hygrométrie au Rez	190
Figure 4-23	Evolution du PMV au Rez	190
Figure 4-24	Evolution du PMV à l'étage	190
Figure 4-25	Taux de surchauffe au Rez pour $v=0\text{m/s}$ et $v=1,5\text{m/s}$	193
Figure 4-26	Taux de surchauffe à l'étage pour $v=0\text{m/s}$ et $v=1,5\text{m/s}$	193
Figure 4-27	Récapitulatif des taux d'inconfort de chaleur des différentes stratégies	197
Figure 4-28	Récapitulatif des taux d'inconfort de fraîcheur des	198

	différentes stratégies	
Figure 4-29	Mise en évidence de la zone de confort commune au climat tempéré et à celui de la bande côtière du Bénin	199
Figure 4-30	Evolution de la demande énergétique de l'immeuble pour les paramètres appartenant à la zone de confort commune aux deux climats au rez	199
Figure 4-31	Evolution de la demande énergétique de l'immeuble pour les paramètres appartenant à la zone de confort commune aux deux climats à l'étage (paramètres de contrôle $T_a=25^{\circ}\text{C}$ et $\text{RH}=68\%$)	200
Figure 4-32	Mise en œuvre du contrôle de la température et de l'humidité relative au Rez (paramètres de contrôle $T_a= 25^{\circ}\text{C}$ $\text{RH}= 68\%$)	200
Figure 4-33	Evolution de la température au Rez	202
Figure 4-34	Evolution de l'hygrométrie durant une journée au rez	202
Figure 4-35	Evolution du PMV au rez de chaussée	203
Figure 4-36	Evolution des températures externe et interne	203
Figure 4-37	Demande énergétique de l'immeuble	206
Figure 4-38	Evolution des températures au rez	206
Figure 4-39	Evolution des températures à l'étage	206
Figure 4-40	Comparaison des températures au rez	207
Figure 4-41	Comparaison des températures à l'étage	207
Figure 4-42	Comparaison des hygrométries au rez	207
Figure 4-43	Comparaison des hygrométries à l'étage	207
Figure 4-44	Comparaison du confort à l'étage	209
Figure 4-45	Comparaison du confort au rez	209
Figure 5-1	Cycle de vie d'un produit	219
Figure 5-2	Fabrication du verre float clair 4mm	220
Figure 5-3	Décomposition de l'énergie primaire totale	222

Figure 5-4	Demande énergétique totale du bâtiment lorsqu'il est équipé du simple vitrage 4mm	224
Figure 5-5	Demande énergétique totale du bâtiment lorsqu'il est équipé du double vitrage 4/16/4	226
Figure 5-6	Demande énergétique totale du bâtiment lorsqu'il est équipé du simple vitrage 4mm	230
Figure 5-7	Demande énergétique totale du bâtiment lorsqu'il est équipé du double vitrage 4/16/4	231

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Consommation et Production de l'énergie électrique au Bénin	3
Tableau 1.1	Comparaison des températures de confort à ABEOKOUTA	12
Tableau 1.2	Les échelles de sensation thermique	13
Tableau 1.3	Conditions de confort en ambiance climatisée à Yaoundé et à Douala	13
Tableau 1.4	Acceptabilité thermique à Yaoundé et à Douala	14
Tableau 1.5	Comparaison des températures de confort à la HAVANE	16
Tableau 1.6	Différentes expression de TSV en Inde	17
Tableau 1.7	Température de confort idéal en fonction du sexe en Inde	17
Tableau 1.8	Les paramètres et indices de confort thermique	18
Tableau 1.9	Appréciation du confort à partir de l'indice SET de GAGGE	21
Tableau 1.10	Température résultante sèche	21
Tableau 1.11	Différents climats au PAKISTAN	39
Tableau 1.12	Equation de confort en climats chauds et humides	40
Tableau 2.1	Caractéristiques des bureaux individuels	56
Tableau 2.2	Description du Rez de chaussée	59
Tableau 2.3	Description du Rez de l'étage	64
Tableau 2.4	Indices PMV et PPD pour $v=0.02\text{m/s}$	67
Tableau 2.5	Indices PMV et PPD pour $v=0.65\text{m/s}$	68
Tableau 2.6	Indices PMV et PPD pour $v=1.2\text{m/s}$	68
Tableau 2.7	Bureaux confortables selon FANGER	72
Tableau 2.8	Température des bureaux confortables selon FANGER	72
Tableau 2.9	Répartition des étudiants selon les sensations recueillies	77

Tableau 2.10	Observations aberrantes	77
Tableau 2.11	Paramètres mesurés et calculés en ambiances climatisées	79
Tableau 2.12	Synthèse de la régression	81
Tableau 2.13	Comparaison entre le MV_{new} et le $PMV_{mesuré}$	82
Tableau 2.14	Multiplication des expériences	82
Tableau 2.15	Conditions de confort en ambiances climatisées	83
Tableau 2.16	Conditions de confort en ambiances climatisées (Influences du climat extérieur)	84
Tableau 2.17	Régression pour modèle validé	856
Tableau 2.18	Zone de confort en fonction de la vitesse de l'air ambiant	90
Tableau 2.19	Calcul du facteur d'espérance pour $t_a=30^{\circ}C$	95
Tableau 2.20	Calcul du facteur d'espérance pour $t_a=29.20^{\circ}C$	96
Tableau 2.21	Présentation des différentes valeurs de PMV pour	99
Tableau 2.22	différentes valeur de température	100
Tableau 2.23	Plages d'humidité relatives confortables communes au climat tempéré et à celui de la bande côtière du Bénin	103
Tableau 2.24	Différents modèles de confort adaptatifs en fonction de différentes valeurs de la constante de GRIFFITHS	104
Tableau 2.25	Calcul de la température de confort adaptatif selon le modèle de HUMPHREY	105
Tableau 2.26	Température de confort en fonction des différents modèles retenus	106/109
Tableau 2.27	Détermination de la zone d'acceptabilité à 90% Calcul de la température de confort adaptatif selon le modèle de GRIFFITHS avec $G=5$	110
Tableau 3.1	Présentation des caractéristiques mécaniques de différents vitrages	130

Tableau 3.2	Caractéristiques typiques de différents vitrages	143
Tableau 3.3	Comparaison des valeurs de U des vitrages revêtus de couche basse émissivité	146
Tableau 3.4	Vitrages utilisés en Egypte	157
Tableau 3.5	Vitrages utilisés en Tunisie	158
Tableau 3.6	Valeurs mesurés des propriétés lumineuses et énergétiques des différents vitrages	165
Tableau 4-1	Récapitulatif de taux de surchauffe	175
Tableau 4-2	Synthèse	176
Tableau 4-3	Optimisation du choix de vitrage	178
Tableau 4-4	Taux d'inconfort pour le vitrage clair float 4mm	182
Tableau 4-5	Taux d'inconfort pour le double vitrage 6/12/6	186
Tableau 4-6	Taux d'inconfort pour le double vitrage 4/16/4	187
Tableau 4-7	Taux d'inconfort pour le double 6/12 /6	191
Tableau 4-8	Taux d'inconfort pour le double 4/16 /4	191
Tableau 4-9	Taux d'inconfort pour le simple vitrage	192
Tableau 4-10	Taux d'inconfort (double et simple vitrage) $v=1.5\text{m/s}$	192
Tableau 4-11	Taux d'inconfort (simple vitrage). Combinaison ombrage et ventilation $v=1.2\text{m/s}$	193
Tableau 4-12	Taux d'inconfort (double vitrage 4/16/4) Combinaison ombrage et ventilation $v=1.2\text{m/s}$	194
Tableau 4-13	Taux d'inconfort (double vitrage 6/12/6) Combinaison ombrage et ventilation $v=1.2\text{m/s}$	194
Tableau 4-14	Taux d'inconfort(simple vitrage). Combinaison ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant $v=1.5\text{m/s}$	194
Tableau 4-15	Taux d'inconfort (double vitrage 4/16/4). Combinaison ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant $v=1.5\text{m/s}$	194

Tableau 4-16	Taux d'inconfort (double vitrage 6/12/6). Combinaison ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant $v=1.5\text{m/s}$	195
Tableau 4-17	Taux d'inconfort (simple vitrage). Combinaison ombrage et night cooling	196
Tableau 4-18	Taux d'inconfort (double vitrage 4/16/4). Combinaison ombrage et night cooling	196
Tableau 4-19	Taux d'inconfort (double vitrage 6/12/6). Combinaison ombrage et night cooling	196
Tableau 4-20	Taux d'inconfort des doubles vitrages en fonction de U, g et S	210
Tableau 4-21	Synthèse de régression	211
Tableau 4-22	Synthèse de régression	212
Tableau 4-23	Synthèse de régression	212
Tableau 4-24	Taux d'inconfort des simples vitrages en fonction de U, g et S	213
Tableau 4-25	Synthèse de régression	213
Tableau 5-1	Consommation en énergie durant la phase de fabrication du verre	222
Tableau 5-2	Données unitaire au sens de la norme NFP01-10 comme étape de cycle de vie du lieu de production au lieu de mise en œuvre	222
Tableau 5-3	Ressources Energétiques	225
Tableau 5-4	Constituant de l'emballage de l'unité fonctionnelle	225
Tableau 5-5	Récapitulatif des impacts	229
Tableau 5-6	Récapitulatif des impacts	232
Tableau 5-7	Energie grise et changement climatique pour les différentes options de verre choisies	232

LISTE DES ABREVIATIONS

S_{sk} : chaleur stockée dans la peau [W/m^2]

$T_a = t_a$: température de l'air ambiant

$T_{cl} = t_{cl}$: la température moyenne de l'habillement [$^{\circ}C$]

T_{cr} : température centrale du corps humain

T_i : Température intérieure moyenne

S_{sk} : le flux de chaleur stocké dans le corps humain

$T_a = t_a$: température de l'air ambiant

$T_{cl} = t_{cl}$: la température moyenne de l'habillement [$^{\circ}C$]

T_{cr} : température centrale du corps humain

T_i : Température intérieure moyenne

T_m : Température extérieure moyenne mensuelle

V_{bl} : débit de sang au niveau de la peau

C_{res} : échanges de chaleur par convection lors de la respiration [W/m^2]

E_{res} : échanges de chaleur par évaporation lors de la respiration [W/m^2]

E_{sk} : échange de la chaleur par évaporation [W/m^2]

C : flux convectif de la chaleur

M : métabolisme [W/m^2]

C_{res} : échanges de chaleur par convection lors de la respiration [W/m^2]

E_{res} : échanges de chaleur par évaporation lors de la respiration [W/m^2]

E_{sk} : échange de la chaleur par évaporation [W/m^2]

C : flux convectif de la chaleur [W/m^2]

R : flux de chaleur par rayonnement [W/m^2]

S_c : chaleur stockée à l'intérieur du corps [W/m^2]

W : travail extérieur [W/m^2]

K : flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau [W/m^2]

f_{cl} : facteur d'habillement

h_c : coefficient de transfert convectif de chaleur à la surface du vêtement [W/m^2K]

ε : émissivité de l'habillement qui d'habitude vaut 0.95

σ : la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut $5.6710^{-8} W/(m^2 K)$

A_r : la surface effective de rayonnement du corps humain [m^2]

k: la constante de Levis qui vaut 2.2C/mmHg

h_c : le coefficient de transfert de chaleur par convection

P_{sk} : la pression de saturation du point de vue de la peau

F_{pcl} :facteur d'efficacité de perméation pour la vapeur d'eau évaporée à partir de la surface de la peau à travers des vêtements à l'air ambiant

E_{diff} : perte évaporative à travers la peau

E_{sw} : flux de chaleur dû à l'évaporation de la sueur nécessaire au maintien de la régulation de la température du corps humain

RH : humidité relative sous forme de fraction

P_{vs} : la pression de saturation

S_{sk} : le flux de chaleur stocké dans le corps humain

S_{cr} : le flux de chaleur stockée dans la partie centrale du corps humain

C_{bl} : la chaleur spécifique du sang

V_{bl} : débit de sang au niveau de la peau

K_{min} : conductance minimale de la peau

T_{cr} : température centrale du corps humain

C'_{sk} : capacité thermique de la peau

C'_{cr} : capacité thermique de la partie centrale du corps humain

t_r : Température moyenne radiante

WBT : Température humide de bulbe

v : vitesse de l'air ambiant

T_{conf} : la température de confort

T_m : Température extérieure moyenne mensuelle

T_i : Température intérieure moyenne

PMV= Predicted mean vote= vote moyen prévisible

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : Evolution de la température ambiante, de l'humidité relative et du PMV a l'intérieur du bâtiment en fonction du vitrage

ANNEXE II: Communications et articles scientifiques

ANNEXE III: Déclarations Environnementales

ANNEXE IV : Facteur solaire du double vitrage

INTRODUCTION GENERALE

Les défis liés aux changements climatiques, la dépendance croissante à l'égard des énergies fossiles comme le gaz et le pétrole et la hausse incessante des prix de l'énergie constituent des problématiques particulièrement d'actualité.

Les impacts économiques et environnementaux engendrés par ces problématiques sont déjà bien connus aujourd'hui et vont inévitablement se renforcer dans l'avenir.

Le Bénin, comme d'autres pays de la sous-région Ouest Africaine, fait face depuis quelques années à une crise énergétique sans précédent, du fait de sa quasi-totale dépendance énergétique vis-à-vis de certains fournisseurs sous régionaux et de la fluctuation du prix du baril de pétrole. Cette crise se manifeste par des phénomènes cycliques de délestage et de coupures intempestives, qui par conséquent entraînent une baisse de performance des unités de production et administrations, tendant ainsi à hypothéquer le développement de ce pays.

En effet, la situation d'approvisionnement en énergie électrique du Bénin, se caractérise par :

- Une forte dépendance de l'importation de l'énergie électrique essentiellement d'origine fossile des pays voisins que sont la Côte d'Ivoire, le Ghana et le Nigéria. Le Bénin dépend de l'extérieur pour plus de 90% de sa consommation électrique. La production par la CEB (Compagnie Electrique sous régionale du Bénin) de l'énergie électrique à partir de la centrale électrique de NANGBETO d'une puissance de 6664MWh fournit une quantité d'énergie égale à 170GWh/an et d'une turbine à gaz de 25 MW.
- Un déficit de l'offre d'énergie électrique au niveau sous régional, entraînant dans les différents pays des crises énergétiques répétées (1983, 1994, 1998, 2006)

- Un taux de perte d'énergie relativement élevé sur le réseau électrique national, variant entre 15 et 20%
- Des faibles performances techniques et financières des entreprises du secteur (CEB, SBEE)
- Une politique de tarification qui ne permet pas aux entreprises du secteur de couvrir les charges relatives à la fourniture de l'énergie électrique.

Comme le montre la figure 1, la couverture de la demande d'énergie électrique par la production nationale est extrêmement faible

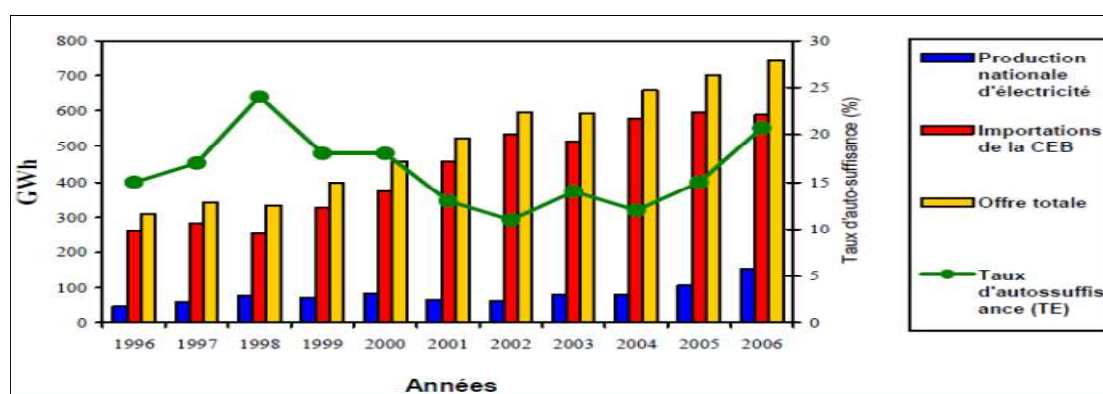


Figure 1 : Couverture et demande énergétique au Bénin (extrait des archives de la DGE)

Cependant, le Bénin dispose d'importants atouts permettant le développement du secteur de l'énergie pour l'amélioration de son autonomie en énergie électrique. Au nombre de ceux-ci, nous pouvons citer :

- La volonté ferme des autorités politico-administratives de conduire à terme la réforme engagée dans le secteur de l'énergie par diverses actions comme l'amélioration de la gouvernance de la SBEE d'une part , et d'autre part, la promotion de l'investissement privé dans le secteur
- Des potentialités énergétiques variées dont principalement l'énergie d'origine hydraulique d'une capacité productible annuelle de 1100 GWh,

la biomasse énergie, le solaire et l'éolien dans certains microclimats où les vitesses moyennes du vent à 10m du sol sont supérieures à 5m/s.

- L'accès du Bénin au gaz naturel du Nigéria à travers le projet gazoduc de l'Afrique de l'Ouest.

L'analyse de la production et de la consommation de l'énergie électrique est donnée par le tableau et le diagramme suivants :

Tableau 1 : Consommation et Production de l'énergie électrique au Bénin (source DGE)

Lignes de bilan (postes)	Electricité (MWh)
Approvisionnement	597 359.36
Pertes en réseau	8676.8
Disponibilité pour la consommation finale	588 682.56
Consommation dans le secteur Industriel	117 601.54
Consommation dans le secteur des services	189 490.02
Consommation dans les ménages	281 590.19
Consommation dans le secteur du transport	0

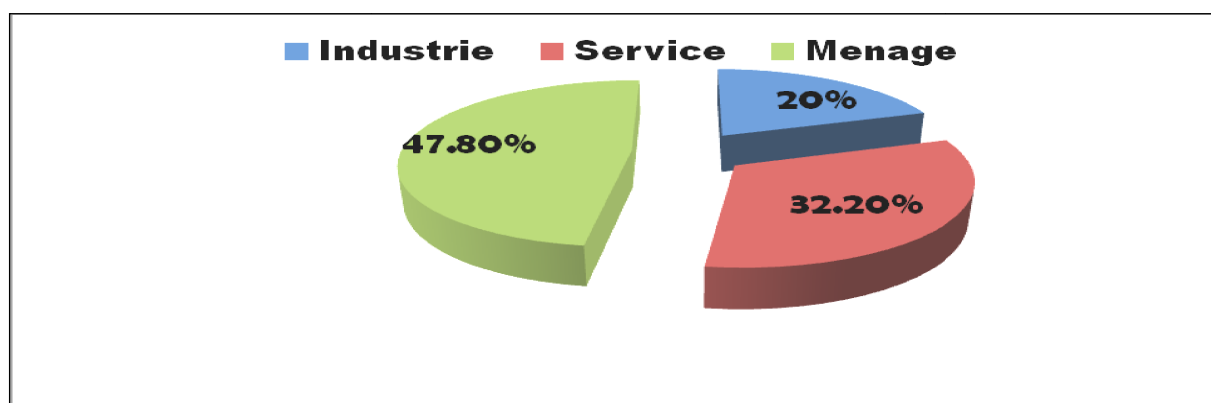


Figure 2 : Taux de consommation d'énergie électrique dans différents secteurs au Bénin (source DGE)

De tout ce qui précède, il est bien visible que la grande partie de l'énergie électrique au Bénin, est utilisée dans le bâtiment et est consacrée à la ventilation, la climatisation et l'éclairage dans les services et ménage. Cette utilisation est très prononcée en zone urbaine où, de nos jours, les habitudes visent à introduire des fenêtres vitrées coulissantes ou des baies vitrées. La recherche de la performance énergétique lors de la conception des bâtiments au Bénin ne devrait-elle pas rester une préoccupation majeure pour un changement de comportement vers une utilisation rationnelle de l'énergie ?

La grande partie **de l'énergie totale consommée au Bénin étant consacrée à assurer le confort thermique des bâtiments**, toute solution innovante et fiable dans ce domaine contribuera à la maîtrise de l'énergie électrique dans ce pays.

En effet, on peut réduire les pertes thermiques d'un bâtiment avec une conception initiale appropriée ou des transformations ultérieures de ce bâtiment. L'optimisation de la consommation d'énergie au moyen des ouvertures dans le bâtiment doit permettre :

- 1) Une réduction de la consommation d'énergie pour le rafraîchissement en région tropicale dont le Bénin
- 2) Une réduction de la consommation de l'énergie pour l'éclairage artificiel.
- 3) Une amélioration du confort en période chaude
- 4) La réduction des émissions de gaz à effet de serre

Loin de garantir ces aspects, le vitrage des fenêtres en région tropicale et plus précisément au Bénin, entraîne une dépense d'énergie excessive pour assurer le confort thermique dans nos bâtiments, du fait des caractéristiques optiques mal connues et par conséquent mal adaptées des verres, conséquence immédiate de l'inexistence au Bénin d'une structure de contrôle ou de caractérisation de verres (pour des vitrages clairs simples ou teintés) qui le plus souvent sont importés de l'Asie ou de l'Europe.

En général, les fenêtres sont considérées comme un facteur de performance important pour le confort des bâtiments qu'ils soient résidentiels, tertiaires ou administratifs. L'éclairage, l'air frais et la vue sont des facteurs cruciaux pour des raisons de santé, et des raisons psychologiques.

A l'instar des pays du nord, l'Afrique se doit de se tourner vers une meilleure technologie des vitrages pour améliorer les qualités thermique et optique des verres utilisés.

En Europe, il y a des avancées dans la technologie des vitrages. Ces améliorations doivent non seulement profiter à nos pays d'Afrique subsaharienne, où la tendance est de mettre du verre sur toutes les ouvertures du bâtiment en influençant ainsi la consommation d'énergie, mais aussi à inciter les africains à mieux s'investir dans le domaine.

Les présents travaux ont permis de définir les caractéristiques des vitrages à mettre en œuvre dans la bande côtière du Bénin, caractéristiques qui allieraient les fonctions suivantes :

- Le contrôle solaire, c'est-à-dire le contrôle de la quantité des gains solaires du bâtiment
- L'isolation thermique, le contrôle des flux de chaleur et de masse d'air.
- La durabilité sur le plan environnemental et sur celui de la mise en œuvre
- La protection de l'intérieur du bâtiment vis-à-vis des intempéries, des insectes et des intrusions
- La maîtrise des coûts.

La plupart des vitrages utilisés dans les bâtiments au Bénin sont clairs et du type « simple vitrage ». Le Bénin, ne disposant pas de structure de contrôle et de caractérisation des verres utilisés pour le vitrage des bâtiments, il se pose la question de leur adéquation aux conditions climatiques du pays.

Pour répondre à cette préoccupation tout en nous appuyant sur les innovations technologiques apparues dans ce domaine, nous avons étudié dans un premier

temps les conditions de confort thermique dans les bâtiments dans la bande côtière du Bénin, caractéristiques sur lesquelles ont pu s'appuyer nos travaux pour un choix judicieux à travers ce qui existe, des paramètres des vitres permettant une économie d'énergies dans cette région.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer plusieurs types de vitrage pour le bâtiment test choisi dans la bande côtière du Bénin et apprécier le confort thermique correspondant. Pour cela nous avons d'abord défini :

- les conditions de confort dans la bande côtière du Bénin, région où est implanté le bâtiment test choisi, et auquel a été appliqué le modèle de FANGER puis adapté aux conditions climatiques de cette région
- la caractérisation des vitres actuellement utilisés au Bénin pour en définir à partir du bâtiment test choisi, la vitre qui permet de maintenir une ambiance intérieure, respectant les conditions hygrothermiques confortables dans la bande côtière du Bénin
- l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment test équipé du vitrage précédemment choisi
- la performance environnementale de la mise en place d'un tel vitrage sur le bâtiment test choisi

La thèse est organisée comme suit :

Chapitre 1 : Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie présente l'état de la recherche sur le confort thermique en régions chaudes et humides. Puis, la deuxième partie est consacrée aux variables influençant le confort thermique en milieu tropical et aux différents modèles mathématiques du confort thermique des bâtiments les plus utilisés actuellement.

Chapitre 2 : Dans ce chapitre, nous avons procédé au choix et à une description du bâtiment, objet de notre étude. Un recueil exhaustif des données sur le bâtiment identifié (géométrie, situation (équipements à l'intérieur), activité des personnes à l'intérieur, orientation des façades....) a été réalisé. A partir des mesures faites dans certains bâtiments de l'Université d'Abomey

Calavi, une appréciation du confort a été réalisée en utilisant le modèle de FANGER, qui a ensuite été comparé aux résultats produits par l'approche de GIVONI. La méthode de FANGER s'étant jusque-là révélée applicable pour les pays du nord, les résultats de nos travaux nous ont montré que l'utilisation du modèle de FANGER n'est possible dans cette région qu'après une adaptation aux conditions climatiques locales. En poursuivant le monitoring des bureaux et dans certaines salles de l'Université, nous avons pu déterminer le coefficient correctif qui permet d'adapter le modèle de FANGER aux conditions climatiques de la bande côtière du Bénin. De ce fait, une zone de confort commune au climat tempéré des pays du Nord et à celle de la bande côtière du Bénin a été identifiée. Celle-ci a permis d'établir les conditions hygrothermiques de travail qui favorisent la collaboration entre travailleurs administratifs béninois originaires de cette région et expatriés européens à Cotonou, une ville située dans la bande côtière du Bénin, dans un souci de convivialité et d'économie d'énergie.

Chapitre 3 : Il est consacré au vitrage des bâtiments. Dans cette partie, un état de l'art des innovations a été réalisé dans ce domaine. Ensuite, nous nous sommes intéressés au cas de l'Afrique et plus précisément à celui du Bénin. Des essais en laboratoire ont permis de déterminer les facteurs énergétiques et lumineux (ou caractéristiques spectrophométriques) des verres souvent utilisés au Bénin dans le bâtiment et par conséquent d'en déduire les caractéristiques de transmission, d'absorption et de réflexion lumineuse et énergétiques de ces vitrages.

Chapitre 4: Dans ce chapitre, les résultats des chapitres 2 et 3 ont permis une meilleure analyse de la performance énergétique du bâtiment à l'aide du logiciel TRNSYS pour des propositions de réalisation du confort thermique sans utilisation de climatisation active. Un accent a été mis sur la ventilation naturelle et nocturne du bâtiment pour évacuer la chaleur emmagasinée dans la journée. A cet effet, les paramètres suivants ont été pris en compte :

- Les conditions climatiques du Bénin
- Les systèmes de conservation de chaleur en jeu, l'inertie thermique du bâtiment
- Les gains internes ou externes (radiatifs, convectifs.....)
- Les matériaux des parois utilisés pour la construction des bâtiments
- Les différents types d'infiltration d'air
- La ventilation et la climatisation

Chapitre 5 : Nous avons, dans ce chapitre évalué les impacts environnementaux des vitrages optimaux pour le bâtiment test choisi en mettant un accent particulier sur le bilan global des émissions de gaz à effet de serre et en évaluant l'énergie grise contenue dans ces vitrages. Une étude comparée des alternatives retenues a été réalisée et nous a permis de choisir le vitrage qui prend en compte les objectifs pour la préservation de l'environnement.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CONFORT THERMIQUE DES BATIMENTS EN CLIMATS CHAUDS ET HUMIDES

I.1 Introduction

La fonction principale de tous les bâtiments, est qu'ils soient adaptés au climat, à l'environnement et aux objectifs pour lesquels ils ont été construits et qu'ils puissent, de ce fait, fournir aux occupants une ambiance interne confortable et propice. Cependant, en cette ère de changement et de réchauffement climatique, où toutes les actions dans le bâtiment convergent vers une performance énergétique, offrir un confort thermique aux occupants d'un bâtiment, avec à la clé une réduction de la consommation énergétique est assez difficile, mais doit rester une préoccupation majeure de tous les architectes et autres concepteurs du bâtiment en ce 21^{ème} siècle.

Le corps humain, se trouvant dans un environnement donné, réagit par un ensemble d'actions rétroactives volontaires ou non, qui permettent à l'homme de contrôler les échanges thermiques avec son environnement. Selon l'intensité et la nature de ces actions et échanges avec l'environnement, l'individu peut sentir la fraîcheur, la tiédeur ou la neutralité thermique.

Le confort thermique est une composante du bien-être de l'homme dans un environnement donné. Il caractérise l'état de bien être dans cet environnement et est défini comme un état d'esprit qui exprime le degré de satisfaction thermique, par rapport à l'environnement (ASHRAE). Cette satisfaction se traduit par l'impossibilité pour un sujet de préciser s'il préfère un environnement plus froid ou plus chaud : c'est la neutralité thermique. Il comporte un aspect physiologique qui peut être affecté de variables psychologiques et sociologiques.

Dans les bâtiments, la sensation de confort ou d'inconfort semble, à priori, être liée à la température de l'air ambiant. Néanmoins, ce paramètre ne constitue pas à lui seul le facteur d'appréciation du confort; en fait c'est l'effet conjoint du rayonnement solaire, de la température ambiante, de la température radiante, de l'humidité relative, de l'agitation de l'air, de l'activité et de

l'habillement qui déterminent le confort thermique de l'homme, dans son environnement proche.

Dans cette première partie de nos travaux, nous allons présenter les connaissances existantes sur le confort thermique plus précisément en climat chaud et humide, tout en nous focalisant sur les approches les plus utilisées.

I.2 Revue bibliographique du confort thermique en climat chaud et humide

Plusieurs études à travers le monde ont été faites sur le confort thermique. Les approches du confort thermique utilisées sont celles de GIVONI, FANGER, GAGGE, et l'approche adaptative dont le pionnier est HUMPHREYS. Tandis que l'approche adaptative utilise les mesures in situ et les enquêtes de terrain pour apprécier la température de confort, les approches de GIVONI, FANGER et GAGGE, en plus des enquêtes et des mesures in situ, utilisent le bilan thermique du corps humain pour déterminer les indices de confort dans un environnement donné.

Dreyfus (1960) [1] fait partie des pionniers de l'étude du confort thermique en Afrique. Il a fait l'heureux constat que les architectures traditionnelles de l'Afrique occidentale permettaient un meilleur confort aux occupants. Nguessan(1990) [2] quant à lui, utilise les paramètres du confort thermique pour faire l'analyse thermique des bâtiments en climat chaud. Jeannot et Djiako (1993) [3] vont dans le même sens, mais proposent les types d'habitats et les matériaux de construction les mieux adaptés à chaque climat tropical.

En mesurant des températures allant de 28.1°C à 34°C et des humidités relatives comprises entre 30.8% et 75.5%, OLANIKPEKUN Emmanuel Abiodun, 2014 [4] a constaté que dans les résidences universitaires de l'Université Obafemi Awolowo d'Ile Ife au Nigéria, plus de 80% de résidents se sentent en situation de confort thermique, soit moins de 20% d'insatisfaits, contre 58% d'insatisfaits prédits par l'indice PPD, pendant que l'indice PMV

de FANGER calculé, donnant une valeur de +1.63, prédit une sensation de chaleur. Par conséquent, il affirme qu'il n'existe aucune correspondance entre le PMV-PPD, calculé selon FANGER et les votes de sensation thermique enregistrés, sur le terrain dans cette région de climat chaud et humide.

Dans le cadre de l'étude de l'efficacité énergétique des bâtiments à ABEOKOUTA, ville présentant le même climat tropical humide que Lagos et la bande côtière du Bénin, Mike ADEBAMOWO et Olumide OLUSANYA, 2012[5] ont étudié le confort thermique des bâtiments dans les résidences de l'institut de risque de cette ville. L'approche utilisée ici étant adaptative, une régression linéaire des sensations thermiques sur le terrain en fonction de la température opérative T_{op} et une comparaison aux résultats obtenus par l'utilisation des modèles adaptatifs de Humphreys et d'Aulicems dans cette région ont donné les résultats suivants (voir tableau 1.1).

Tableau 1.1: Comparaison des températures de confort à ABEOKOUTA

Saison/mois	Moyenne		Température prévues de confort		Température de confort idéale	
	Tm (extérieure mensuelle) (°C)	Ti (intérieure) (°C)	Humphreys	Auliciems	TSV (ASHRAE) °C	TCV (Bedford) °C
Saison sèche (Décembre-Mars)	30.3	31.5	28	28.58	29.68 (R=0.358)	30.95 (R=0.267)
Saison des pluies (Avril-Novembre)	28.5	30.3	27	27.75	29.09 (R=0.364)	30.74 (R=0.287)
Toutes les saisons	29.5	30.5	27.5	27.99	29.30 (R=0.269)	30.81 (R=0.202)

Tableau 1.2 : Les échelles de sensation thermique

L'échelle de Bedford	L'échelle ASHRAE (PMV)	L'échelle MC Intre (Préférence)
7 Très chaud	7 (+3) Très chaud	3 (+1) Plus chaud
6 Chaud	6 (+2) Chaud	2 (0) Aucun changement
5 Confortablement chaud	5 (+1) Légèrement chaud	1 (-1) Plus frais
4 Confortable	4 (0) Neutre	
3 Confortablement froid	3 (-1) Légèrement froid	
2 Froid	2 (-2) Froid	
1 Très froid	1 (-3) Très froid	

Au Cameroun, et précisément à Yaoundé et à Douala, A. KEMAJOU [6] et autres ont utilisé la méthode statistique et ont réalisé des régressions linéaires des sensations thermiques à partir des échelles ASHRAE(J1) et Mc Intre (J2) (voir tableau 1.2), pour déterminer les températures de confort idéales des bâtiments climatisés à Yaoundé et à Douala au Cameroun qui sont aussi des villes à climat tropical humide.

En effet, les conditions de confort idéal en ambiance climatisée et les zones de confort thermique dans chacune de ces deux villes à climat tropical et humide sont présentées dans les tableaux 1.3 et 1.4

Tableau 1.3 : Conditions de confort en ambiance climatisée à Yaoundé et à Douala (A.KEMAJOU)

Ville	Yaoundé	Douala
Température de confort idéale (°C)	24.24°C	26.10°C
Humidité relative de confort thermique idéal (%)	59	51.4

Tableau 1.4 : Acceptabilité thermique à Yaoundé et à Douala

Ville	Yaoundé	Douala
Acceptabilité thermique	$23.28 < T_o < 27.21$	$24 < T_o < 28.13$
	RH=60% à 27.21°C ET 70% à 23.28°C	RH=60% à 28.13°C ET 69% à 24°C

En définitive, il considère que les températures de confort idéal dans les bâtiments climatisés à Yaoundé et à Douala sont proches de celles prédites par les normes internationales et que les camerounais accepteraient des températures élevées par rapport aux personnes des zones tempérées, car ceux-ci n'éprouveraient pas d'inconfort thermique dans la plage des températures comprises entre 27°C et 28°C en ambiance climatisée.

En étudiant le confort thermique au Ghana et précisément à ACCRA, Simons BARBARA [7], a remarqué que le fonctionnement des bâtiments de haut standing comme celui des bâtiments entièrement vitrés, est tributaire d'une utilisation accrue d'énergie électrique.

Pour cela, il suggère l'équipement de ces types d'immeuble d'un système de ventilation naturelle et/ou de systèmes d'ombrage. Ceci pourra contribuer à la réduction de la consommation d'énergie en améliorant le confort thermique de ces immeubles au Ghana. Il suggère aussi dans ses travaux que, les futurs immeubles de haut standing produisent leur propre énergie par l'incorporation au bâtiment d'un équipement de système solaire photovoltaïque, ou de tout autre système d'énergie renouvelable pour contribuer de cette façon à la réduction de la charge électrique sur le réseau national. Ce faisant, l'implantation à ACCRA, au GHANA d'un bâtiment de haut standing devrait être précédée d'une recherche scientifique, afin d'en apprécier la performance énergétique pour prendre en compte les différentes stratégies d'amélioration qui s'imposeraient.

Par ailleurs, il suggère que la prise en compte de la coutume en matière d'habillement considérée comme une adaptation comportementale du point de vue thermique, pourra permettre de ne point trop baisser les températures de consigne, source d'un appel en énergie à l'intérieur des bâtiments.

Pour finir, il recommanderait aux autorités politiques du GHANA, l'adoption d'une vision nationale qui mette en avant, l'architecture verte et durable pour prévoir les dépenses énergétiques, liées à la recrudescence des bâtiments de haut standing comme les bâtiments entièrement vitrés dans ce pays.

Les investigations à la HAVANE au Cuba, ville de climat chaud et humide, par Abel TABLADA et autres [8] ont montré que, l'utilisation de l'approche du PMV étendu ou corrigé de FANGER [9] peut paraître plus critique dans les bâtiments climatisés en climat chaud et humide. Selon lui, la mauvaise estimation du facteur d'espérance de FANGER et d'autres aspects comme la stabilité des conditions climatiques et la qualité de vie pourraient en être à l'origine. En effet durant leurs investigations, pour un PMV original (FANGER) de 2.11, non concordant à la valeur moyenne des sensations thermiques exprimées sur le terrain égale à 1.7, le PMV étendu ou corrigé donne deux valeurs différentes obtenues de deux manières différentes. Une diminution de la valeur du métabolisme donne une valeur de 1.77 proche de celle exprimée par les participants aux enquêtes, tandis que celle calculée à partir du facteur d'espérance de 0.58 donne une valeur de 1.1. De ce fait ne serait – on pas tenté de dire que la non concordance entre les votes de sensation thermiques sur le terrain et le PMV calculé de FANGER aurait pour cause les erreurs d'estimation de métabolisme ?

En utilisant différents modèles de l'approche adaptative et deux régressions linéaires différentes de la sensation thermique (échelle ASHRAE, BEDFORD) des occupants des bâtiments en fonction de la température effective (ET), il a obtenu les résultats suivants (équations 1.1 et 1.2 et tableau 1.5) :

$$PMV = 0.449 ET - 12.79 \quad R^2 = 0.097 \quad (1.1)$$

$$T_{conf} = 28.5^\circ C \quad (\text{ASHRAE})$$

$$PMV = 0.3953 ET - 11.1 \quad R^2 = 0.1253$$

$$T_{conf} = 28.1^\circ C \quad (\text{BEDFORD})$$

T_{conf} étant la température de confort (1.2)

Tableau 1.5: Comparaison des températures de confort à la HAVANE (Abel TABLADA et autres)

Modèle adaptatif et équation de la température de confort	°C
Tconf (regression ASHRAE)	28.5
Tconf (regression Bedford)	28.1
Tconf (Humphreys, 1978)	25.4
Tconf (Aulicems, 1983)	27.6
Tconf (Nicol and Humphreys, 2002)	28.2
Tconf (de Dear Brager, 1997)	26.3
Tconf (de Dear et autres)	27.2

A travers le tableau 1.5, on constate que seul le modèle adaptatif (Nicol et HUMPHREYS, 2002) donne une valeur égale à celle obtenue à partir des mesures du terrain.

En Inde et en région de climat chaud et humide, E. Rajaserkar et A. Ramachandraiah [10] mettent en évidence, la non concordance entre les températures de confort obtenues sur le terrain par l'utilisation de l'approche du confort adaptatif et de celle des normes internationales. Une régression linéaire calculée entre le vote de sensation thermique TSV et la température résultante T_g , il a alors obtenu une régression (équation 1.3) qui lui a permis de déterminer que la zone de confort en Inde ($-0.5 \leq TSV \leq 0.5$) est comprise entre $27.6^\circ C$ et $30.5^\circ C$. Cependant la température résultante de confort idéale est de $29^\circ C$. A chaque variation de $3^\circ C$ de la valeur pour la température du globe, il remarque que le vote de sensation thermique TSV augmente d'une

unité. D'autres régressions réalisées avec des coefficients de régression moyens ont donné les valeurs de TSV en fonction des différents facteurs environnementaux (Tableau 1.6)

$$TSV = 0.34T_g - 9.72 \quad \text{avec } R^2 = 0.58 \quad (1.3)$$

T_a : Température ambiante interne

WBT : Température humide

v : vitesse de l'air ambiant

RH : Humidité relative

Tableau 1.6 : Différentes expressions de TSV en Inde

équations de confort	R^2
$TSV = 0.33 T_g + 0.04 WBT - 1.47 \sqrt{v} - 9.37$	0.700
$TSV = 0.34 T_g + 0.004 RH - 1.46 \sqrt{v} - 9.02$	0.697
$TSV = 0.31 T_g - 1.44 \sqrt{v} - 8.21$	0.697
$TSV = 0.31 T_a - 1.42 \sqrt{v} - 8.21$	0.691
$TSV = 0.2 OAT - 1.43 \sqrt{v} - 4.71$	0.667
$TSV = 0.34 T_g - 9.72$	0.579
$TSV = 0.33 T_a - 9.73$	0.577
$TSV = 0.21 OAT - 6.08$	0.552

Il a aussi montré que la température idéale de confort dépend du sexe et de l'utilisation ou non d'une climatisation (voir tableau 1.7)

Tableau 1.7 : Température de confort idéale en fonction du sexe en Inde

Catégories	Température de confort idéal (T_g °C)
Hommes	29.7
Femmes	28.1
Ambiance climatisée	25.4
Ambiance non climatisée	27.2

Il a enfin été constaté que le modèle PMV de FANGER n'est pas conforme aux votes de sensations thermiques recueillis sur le terrain. Le modèle de Fanger surestime le confort en climat chaud et humide, la température de confort

idéale par le modèle de FANGER de 24.9°C, étant inférieure d'environ 4°C par rapport au vote de sensation thermique idéal, recueilli sur le terrain.

Abondant dans le même sens, Fergus Nicol[11] a montré que le modèle du confort thermique de FANGER n'est pas adéquat pour un climat chaud et humide, du fait de ses limites d'applicabilité (voir tableau 1.8)

Selon lui, en climat tropical, il serait évident que le modèle PMV de FANGER ne soit pas concordant avec les sensations thermiques recensées sur le terrain puisque à l'intérieur des bâtiments naturellement ventilés, la température ambiante est souvent supérieure à 30°C et la vitesse de l'air ambiant pourrait excéder 1m/s.

Aussi, remarque-t-il en outre qu'en climat tropical, la température et la vitesse de l'air ambiant sortent des intervalles indiquées pour l'application du modèle de FANGER ; celle-ci ne pourra de plus pas refléter les sensations thermiques sur le terrain du fait de l'hypothèse stationnaire qu'exige le bilan thermique fait par FANGER. Il suggère alors l'utilisation de l'adaptatif en climat chaud et plus précisément dans les bâtiments naturellement ventilés du fait de la forte corrélation existant entre la température à l'extérieur et celle à l'intérieur des bâtiments.

Tableau 1.8 : Domaine d'applicabilité du modèle PMV de FANGER

Variable	Unité	borne inférieure	borne supérieure
Métabolisme	W/m ² (met)	46 (0,8)	232 (4)
Isolation vestimentaire	°C/W (clo)	0 (0)	0.31 (2)
Température de l'air ambiant	°C	10	30
Température radiante	°C	10	49
Vitesse de l'air ambiant	m/s	0	1
Pression de vapeur d'eau	Pa	0	2700
PMV		-2	2

Nous rappelons que le MET exprime le ratio entre la consommation d'énergie au cours de l'effort et la consommation d'énergie au repos.

I.3 Les paramètres et indices du confort thermique

Les paramètres les plus utilisés dans l'évaluation du confort thermique sont divisés en deux groupes :

- Paramètres physiologiques. Ce sont le métabolisme et l'habillement. En climat chaud, certains chercheurs préfèrent ajouter la mouillure de la peau, le taux de sudation, la température rectale et la température de la peau.
- Paramètres environnementaux. Ce sont la température de l'air ambiant, l'humidité relative de l'air ambiant, la température moyenne de rayonnement des parois et la vitesse de l'air ambiant.

Il existe cependant une autre classe de paramètres qui échappe à toute modélisation. Il s'agit des paramètres d'adaptation du sujet aux conditions climatiques.

I.3.1 Indices de confort

La mise en place d'un indice de confort a été l'une des préoccupations de plusieurs scientifiques s'occupant du confort et de l'efficacité énergétique des bâtiments. Cependant la complexité du confort thermique n'a pas permis d'élaborer un indice unique intégrant toutes les exigences de confort et les particularités d'appréciation subjective qui varient d'un individu à un autre et d'un climat à un autre.

Les premiers travaux sur les indices de confort thermique dans le bâtiment ont été faits par YAGLOU [13]. Il a caractérisé les ambiances chaudes par une température effective.

De nos jours, il existe une kyrielle d'indices différents, cependant les plus utilisés sont ceux de FANGER et le confort adaptatif

Evidemment, les indices de FANGER (PMV et PPD) sont beaucoup plus utilisés pour les climats tempérés et donnent pour la majeure partie des cas, des résultats très intéressants. Ils ont fait l'objet de normes ISO 7730 et sont plus

recommandés pour les climats tempérés et surtout pour des conditions stationnaires, que pour les climats chauds !

Les travaux des chercheurs américains et en particulier ceux de GAGGE [14] ont permis de définir des indices applicables au pays chauds. Parmi ceux-ci, on peut retenir les suivants :

1°) La température effective (ET) et toutes celles qui en résultent à savoir, la température effective corrigée (CET) et la nouvelle température effective (ET* ou NET). Cet indice a été défini par YAGLOU puis amélioré par GAGGE. Son utilisation est limitée aux conditions suivantes :

- $T_a = T_r$; ce qui voudrait dire que l'ambiance est à la même température que les parois
- L'habillement et l'activité sont définis de façon standard

La nouvelle température effective ET* est définie comme étant la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50% d'humidité relative, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait une même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Cet indice prend en compte les effets de la température et de l'humidité et pour le calculer, il faut connaître la mouillure cutanée et l'indice de perméabilité à la vapeur d'eau des vêtements

2°) La température effective standard (SET) définie par GAGGE. Elle se définit par rapport à une ambiance uniforme ($T_{air} = T_r$). Le sujet est caractérisé par une activité sédentaire ($M = 1.1 \text{ met}$) et un habillement faible ($I_{cl} = 0.6 \text{ clo}$). La vitesse de l'air est fixée à 0.15m/s et l'hygrométrie à 50%.

Tableau 1.9. Appréciation du confort à partir de l'indice SET de GAGGE ;

Indice SET (°C)	Sensation thermique	Etat physiologique au repos
$22.2 < SET < 25.6$	Confortable	neutre
$25.6 < SET < 30.0$	Tiède, à peine acceptable	Légère sudation, vaso-dilatation
$30 < SET < 34.5$	Assez chaud, inconfortable, inacceptable	sudation

3°) La température résultante sèche qui est la moyenne de la température de l'air et de la température moyenne radiante est une forme simplifiée de l'étude quantitative des échanges par convection et rayonnement. Il est imaginé pour cela que l'air et les parois ont une même température telle que la puissance globale échangée par convection et rayonnement est la même. La température résultante sèche qui assure l'équilibre thermique des personnes dépend principalement de leur niveau d'activité et d'habillement pour une condition d'air calme ($v \leq 0.2m/s$) et une hygrométrie moyenne (tableau 1.10).

Tableau 1.10 : Température résultante sèche

Activité	Métabolisme (met)	Vêture (clo)	Température résultante sèche(°C)
Repos, sommeil	0.8	2.2	$18 (\pm 3)$
Activité sédentaire	1	1.5	$20 (\pm 2.5)$
Activité légère	2	1	$16 (\pm 3)$
Activité forte	3	1	$10 (\pm 4)$
Hygiène personnelle	1.4	0	$27(\pm 1)$

4°) Le taux prédit de sudation après 4 heures d'exposition qui est un indice établi de façon empirique pour apprécier l'adaptation d'un individu à une ambiance donnée.

5°) L'indice de contrainte thermique de GIVONI (ITS) qui lui, prévoit la contrainte thermique de l'organisme en tenant compte du rendement évaporatoire de la sudation. Cet indice est proportionnel au rapport $\frac{E_{req}}{\chi}$, une valeur qui s'exprime en (g/h), E_{req} étant le débit sudoral requis pour ramener le corps dans un état de confort acceptable et χ , l'efficacité de la sudation dans la recherche du confort.

6°) La température du globe est obtenue à partir de la température d'un bulbe humide non ventilé, de la température d'air et de celle du globe noir.

7°) La température subjective (T_{subj}) est définie à partir de la température du globe et de la vitesse de l'air. Cet indice permet d'évaluer la contrainte thermique agissant sur l'organisme avec uniquement la mesure de deux paramètres à savoir la température du globe et la vitesse de l'air.

8°) La température opérative qui est la moyenne pondérée de la température de l'air ambiant et de celle de la température moyenne radiante. Une température humide qui se réfère à un corps noir placé dans une atmosphère saturée à 100% et une température opérative standard (TOS) a été développée par GAGGE autour de cette température opérative. Cette valeur TOS permet d'apprécier l'effet de la sudation dans les conditions standards comme défini au tableau 1.8.

9°) La température résultante, développée par Missenard (1948) est utilisée pour des températures de l'air ambiant comprise entre 20-45°C, une température humide comprise entre 18 – 40°C et une vitesse de l'air entre 0m/s et 3m/s

Comme l'a notifié NGUESSAN, des remarques s'imposent quant à la validité de tous ces indices pour rendre compte de manière conséquente de la situation de confort d'un individu placé dans une ambiance chaude et humide et ayant une activité et un habillement quelconque. Ces remarques ont été formulées par BERGER. Il a surtout insisté sur les restrictions de chaque indice et son applicabilité. Par contre, il apparaît que les meilleurs indices qui rendraient mieux compte de l'inconfort en climat chaud seraient la mouillure cutanée et le débit sudoral.

En effet, ces deux indices apparaissent comme étant les facteurs les plus sensibles pour évaluer le confort d'un individu dans un climat chaud.

Plus précisément en climat chaud et humide, la mouillure cutanée serait l'indice d'inconfort lié à la difficulté d'évaporation de la sueur qui recouvre la peau. Pour des hygrométries supérieures à 60% et des températures d'air supérieures à 30°C, caractéristique des climats chauds et humides, la mouillure cutanée croît rapidement [J.C. DEVAL et X.BERGER, 1983] et [Cossi, Norbert Awanou, 1984]. La température étant souvent constante dans ces régions de climats chauds et humides des pays d'Afrique subsaharien, l'étude du confort thermique pourra alors dépendre de l'humidité relative. Nous le verrons dans le chapitre 2 qui va suivre.

I.3.2 Diagrammes de confort

Dans ce domaine, on peut citer les diagrammes bioclimatiques d'Olgay, de Givoni et les tables de Mahoney et la méthode de Szokolay. Ces outils permettent de choisir les grandes options architecturales à partir des exigences du confort thermique et des profils du climat extérieur. On confronte sur un même graphique, 'un polygone de confort ' représentant les conditions extérieures et l'aire d'influence thermique et hygrométrique de certaines solutions architecturales en vue d'obtenir le confort thermique.

Plus précisément, le diagramme de GIVONI utilise les critères de mouillure cutanée et de sudation pour définir chaque zone de confort dans le diagramme de l'air humide.

Le confort étant plus caractérisé par la mouillure en climat chaud et humide, selon GIVONI, la ventilation accélérerait le rafraîchissement du corps et constituerait le facteur le plus important dans la recherche du confort

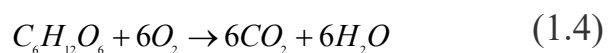
I.4 Le confort thermique des bâtiments : Approches Classiques

I.4.1 Bilan thermique du corps humain

I.4.1.1 Modèle de GAGGE

L'aspect physiologique du confort thermique (Givoni, 1978), (Fanger, 1970) est caractérisé par les différents phénomènes de transfert de chaleur et de masse modélisés par l'équation du bilan thermique du corps humain avec son environnement. Cette approche physiologique, est souvent utilisée dans le bâtiment par les architectes et ingénieurs du génie civil à des fins de prévision en vue de minimiser la consommation énergétique des bâtiments.

En effet, la quantité d'énergie nécessaire à un individu pour maintenir le bon fonctionnement de ses organes vitaux et l'activité musculaire est appelé le métabolisme. Il est caractérisé par la réaction d'oxydation du glucose [12] décrite par la réaction chimique suivante :



Avec une variation d'enthalpie :

$$\Delta H = -2813 KJ / mole \quad (1.5)$$

Il est alors évident que la mesure de la consommation d'oxygène permet d'évaluer la quantité de chaleur métabolique, c'est-à-dire le métabolisme total (M_T) d'un individu. Ceci est représenté par la relation qui met en évidence le volume d'oxygène consommé (V_{O_2} en litres par minute) dans les conditions normales de température et de pression et le quotient respiratoire Q qui varie de 0.83 au repos à 1 [12] lors d'un travail modéré.

$$M_T = 352(0.23Q + 0.77)(V_{O_2} / A_{DU}) \quad (1.6)$$

Au repos ou durant un travail de bureau, toute l'énergie produite est transformée en chaleur. C'est le métabolisme banal qui vaut 58.15 W/m^2 . Au cours d'un travail physique, une fraction de l'énergie produite par la consommation d'oxygène est transformée en énergie mécanique et n'est pas dégradée.

Par conséquent, le métabolisme thermique serait alors égal au métabolisme énergétique total diminué de la fraction de ce métabolisme énergétique qui fournit du travail et n'est alors pas dégradée à l'intérieur de l'organisme.

Cette énergie dégagée sous forme de chaleur se propage de l'intérieur du corps humain vers l'extérieur de l'organisme par les tissus et surtout par le phénomène de convection sanguine.

La répartition énergétique et les coefficients locaux d'échange thermique font que le noyau central est à une température de 37°C .

Dès lors, le bilan thermique de l'homme peut s'obtenir à partir des échanges thermiques du corps humain avec son environnement en comptabilisant les contributions de la production interne de chaleur, des échanges radiatifs, convectifs, conductifs et évaporatoires. Il peut s'écrire sous la forme de la relation mathématique (1.4).

$$M - w = (C + R + K + E_{sk}) + (E_{res} + C_{res}) + S_{sk} + S_c \quad (1.7)$$

M : métabolisme [W/m^2]

w : travail extérieur [W/m^2]

C : flux convectif de la chaleur [W/m^2]

R : flux de chaleur par rayonnement [W/m^2]

K : flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau [W/m^2]

E_{sk} : échange de la chaleur par évaporation [W/m^2]

E_{res} : échanges de chaleur par évaporation lors de la respiration [W/m^2]

C_{res} : échanges de chaleur par convection lors de la respiration [W/m²]

S_{sk} : chaleur stockée dans la peau [W/m²]

S_c : chaleur stockée à l'intérieur du corps [W/m²]

Ce type de bilan, développé par Gagge et al. (1941, 1986), est établi en condition transitoire. Les flux de chaleur S_{sk} stocké dans la peau et celui S_c stocké à l'intérieur du corps sont proportionnels aux dérivées des températures en fonction du temps. C'est d'ailleurs en cela que réside le caractère transitoire du bilan fait par GAGGE. Ce modèle de GAGGE représente le corps humain par deux nœuds concentriques représentant respectivement le centre du corps et la peau.

Le flux de chaleur convectif est défini par la relation suivante :

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (1.8)$$

f_{cl} : facteur d'habillement

h_c : coefficient de transfert convectif de chaleur à la surface du vêtement [W/m²K]

T_{cl} : température moyenne de l'habillement [°C]

T_a : température de l'air ambiant

Il faut noter que le coefficient convectif peut dépendre de la vitesse relative de l'air ambiant. Ainsi ,en environnement mécaniquement ventilé, ce coefficient vaut :

$$h_c = 12.1v^{0.5} \quad (1.9) \text{ v étant la vitesse de l'air ambiant}$$

Par contre, dans un environnement naturellement ventilé,

$$h_c = 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} \quad (1.10)$$

Le flux de la chaleur radiatif est donné par la relation suivante :

$$R = f_{cl} h_r (T_{cl} - T_r) \quad (1.11)$$

où T_r est la température moyenne radiante en $^{\circ}\text{C}$ et h_r le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement à la surface de la vêtue. Il peut être calculé par la relation suivante :

$$h_r = 4\varepsilon\sigma(A_r / A_d)[273.2 + (T_{cl} - T_r) / 2]^3 \quad (1.12)$$

Où :

ε : émissivité de l'habillement qui d'habitude vaut 0.95

σ : la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut $5.6710^{-8} \text{ W } / (\text{m}^2 \text{ K}^4)$

A_r : la surface effective de rayonnement du corps humain $[\text{m}^2]$

$$A_d = 0.202 m^{0.425} H^{0.725} \quad (1.13) \quad (\text{Aire de Dubois, m étant la masse en kg et H la taille de l'individu en m})$$

La perte sensible de chaleur à travers la peau est la somme des flux de chaleur radiatifs-et convectifs

$$C + R = f_{cl}[h_c(T_{cl} - T_a) + h_r(T_{cl} - T_r)] = f_{cl}h(T_{cl} - T_o) \quad (1.14)$$

Avec :

$$h = h_r + h_c \quad (1.15)$$

$$\text{et } T_o = \frac{h_r T_r + h_c T_a}{h_r + h_c} \quad (1.16)$$

Au niveau des voies respiratoires, les échanges par convection (C_{res}) ont lieu aussi bien à l'inspiration qu'à l'expiration. Comme le plus souvent, même dans les pays chauds, la température centrale est supérieure à la température de l'air ambiant, l'air inspiré se réchauffe au contact des voies respiratoires et les refroidit.

$$\begin{aligned} C_{res} &= 0.0014M(34 - T_a) \text{ pour } 15^{\circ}\text{C} < T_a < 30^{\circ}\text{C} \\ C_{res} &= 0.0014M(35 - T_a) \text{ pour } T_a > 30^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Le flux d'énergie par évaporation respiratoire est quant à lui donné par la relation suivante :

$$E_{res} = 0.0173M(P_a - 5.87) \text{ où } P_a \text{ est la pression partielle en vapeur d'eau}$$

La production de sueur par les glandes sudoripares est, à l'inverse, déclenchée de façon active par le système thermorégulateur et l'évaporation constitue le principal moyen de déperdition thermique. Si la peau est entièrement recouverte de sueur, l'évaporation maximale est donnée par la relation suivante :

$$E_{\max} = k h_c (P_{sk} - P_{vsRH}) F_{pcl} \quad (1.18)$$

où :

k : la constante de Levis qui vaut 2.2C/mmHg

h_c : le coefficient de transfert de chaleur par convection

P_{sk} : la pression de saturation du point de vue de la peau

F_{pcl} :facteur d'efficacité de perméation pour la vapeur d'eau évaporée à partir de la surface de la peau à travers des vêtements à l'air ambiant

En général, la peau est rarement recouverte de sueur. Le rapport entre la surface mouillée (A_e) et la surface totale (A_d) déterminera la mouillure cutanée η . On peut alors écrire :

$$\eta = \frac{A_e}{A_d} \cdot \quad (1.19)$$

La perte par évaporation E est donnée par : $E = \eta E_{\max}$

Si on appelle E_{sk} , le flux de chaleur à travers la peau :

$$E_{sk} = E_{diff} + E_{rsw} \quad (1.20)$$

Pour l'activité métabolique de 70 W/m², qui correspond à une activité de bureau que nous allons considérer dans la suite de nos travaux, il peut y avoir ou ne pas y avoir de production de sueur. Malgré qu'il n'y ait pas dans ce cas production de travail, il peut y avoir production de sueur si l'on ressent une sensation de surchauffe pendant un temps d'exposition relativement important. S'il ne fait pas trop chaud, il n'y aura pas de phénomène de sudation. Ainsi, on pourra écrire que $E_{rsw}=0$. Comme l'ont montré Brebner et autres, lorsque

$E_{rsw}=0$, E_{diff} est proportionnel à E_{max} , la puissance évaporative de l'environnement. Utilisant leurs données, il a été établi :

$$\frac{E_{diff}}{E_{max}} = 0.06 = w_{diff} \quad (1.21)$$

La valeur 0.06 représente l'humidité normale de la peau humaine sans sueur.

D'après Gagge et autres, la perte de flux de chaleur E_{sk} par la peau en environnement chaud peut s'écrire :

$$E_{sk} = (0.06 + 0.94w_{rs})E_{max} \quad (1.22)$$

w_{rs} , étant la sudation et est donnée la relation :

$$w_{rs} = \frac{E_{rsw}}{E_{max}} \quad (1.23)$$

En considérant notre environnement uniforme en en température T_a , la chaleur échangée par la peau vers l'extérieure s'écrit de la façon suivante :

$$(R + C) = h(T_{sk} - T_a)F_{cl} \quad (1.24)$$

Où :

h : est la somme des coefficients d'échange par rayonnement, radiation et par convection

F_{pcl} et F_{cl} sont calculés par les expressions suivantes [13]

$$F_{cl} = \frac{1}{1 + 0.155(h_c + h_r)I_{cl}} \quad (1.25)$$

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + 0.143h_c I_{cl}} \quad (1.26)$$

Dans l'équation (1.23) il faut connaître l'expression de T_{sk} , la température de la peau.

L'expression de la température de la peau est donnée par le système d'équations différentielles suivant

$$\frac{\partial T_{sk}}{\partial t} = \frac{S_{sk}A}{c'_{sk}} \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial T_{cr}}{\partial t} = \frac{S_{cr}A}{c'_{cr}} \quad (1.28)$$

Où :

$$Ssk = K_{\min} (Tcr - Tsk) + c_{bl} \dot{V}_{bl} (Tcr - Tsk) - Esk - (R + C) \quad (1.29)$$

$$Scr = (M - Eres) - K_{\min} (Tcr - Tsk) - c_{bl} \dot{V}_{bl} (Tcr - Tck)$$

Ssk : le flux de chaleur stocké dans le corps humain

Scr : le flux de chaleur stockée dans la partie centrale du corps humain

C_{bl} : la chaleur spécifique du sang

V_{bl} : débit de sang au niveau de la peau

K_{min} : conductance minimale de la peau

Tcr : température centrale du corps humain

c'_{sk} : capacité thermique de la peau

C'_{cr} : capacité thermique de la partie centrale du corps humain

La chaleur spécifique du corps étant de 0.97W(hr)/(kg)(C) :

$$c'_{sk} = 0.97m_{sk} \quad (1.30)$$

$$c'_{cr} = 0.97m_{cr}$$

La peau représente une mince enveloppe de masse m_{sk}, ; l'intérieur du corps humain comme une couche centrale de masse m_{cr}.

Les conditions initiales de la température de la peau et celle de la température centrale du corps humain sont respectivement [13] :

$$Tsk0 = 34.1^{\circ}C \quad (1.31)$$

$$Tcr0 = 36.6^{\circ}C$$

Les réponses physiologiques du corps humain sont comparées à la température thermique de neutralité où l'organisme humain ne déploie pratiquement aucun effort vasculaire ou de sudation. Ces températures sont respectivement 34.1°C et 36.6°C pour la peau et la partie centrale du corps humain. Si l'erreur obtenue par cette comparaison est positive, les thermorécepteurs spécifiques à la sensation chaude du corps humain sont activés. Par contre, si cette erreur est négative, les thermo récepteurs spécifiques à la sensation froide sont activés.

De ce fait le signal de contrôle de l'organisme humain est donné par les relations ci – dessous [1]

$$\sum_{sk} = T_{sk} - 34.1 \quad (1.32)$$

$$\sum_{cr} = T_{cr} - 36.6$$

Le débit du sang au niveau de la peau est donné par la relation suivante [13] :

$$\dot{V}_{bl} = \frac{6.3 + 7.5 \sum_{cr}}{1 - 0.5 \sum_{sk}} \quad (1.33)$$

Dans l'équation (1.32) si T_{sk} ou T_{cr} sont respectivement inférieurs à 34.1 et 36.6 (sensation de froid), on pose par convention \sum_{sk} et \sum_{cr} sont égaux à zéro. En effet le phénomène de vasoconstriction gouverne la sensation du froid par la peau ou le noyau central du corps humain, puisque le débit sanguin du noyau central vers la peau est faible.

La sensation de la chaleur s'explique par un débit important du sang du noyau central du corps humain vers la peau dont la température devient supérieure à 34.1°C.

Le signal d'erreur positif du noyau central du corps humain explique une sensation de chaleur au niveau du noyau central, sensation qui entraîne le phénomène de vasodilatation et qui fait appel à la sudation. Par conséquent, le taux de sudation est aussi défini par la relation suivante :

$$m_{rsw} = 250 \sum_{cr} + 100 (\sum_{cr}) (\sum_{sk}) \quad (1.34)$$

Le flux d'énergie perdu par sudation est défini par la relation suivante [13]

$$E_{rsw} = 0.7 m_{rsw} [2^{(T_{sk} - 34.1)/3}] \quad (1.35)$$

I.4.1.2 Modèle de FANGER

FANGER reprend cette équation précédemment établie par GAGE et al (1941, 1986) et fait l'hypothèse suivante :

- le gain de chaleur par l'homme dans un environnement donné doit être égal aux pertes de chaleur cédées par l'homme à cet environnement. On

parle de neutralité thermique. Evidemment, si celle-ci n'est pas respectée, la température centrale du corps humain augmente ou diminue.

Par conséquent, FANGER néglige dans son développement les termes de stockage de chaleur dans la peau et à l'intérieur du corps et fait l'hypothèse selon laquelle l'homme doit évacuer l'énergie produite par son activité métabolique pour être dans un état de confort thermique. De ce fait, le débit de stockage énergétique dans l'organisme doit être nul. Ce qui voudrait dire qu'un individu en situation de confort, doit être en équilibre thermique avec son environnement. Ceci suppose qu'il doit être déjà acclimaté à l'ambiance et non en situation d'adaptation ou de défense face à des contraintes thermiques.

Il en vient que le bilan thermique du corps humain selon FANGER s'écrit :

$$M - w = (C + R + K + E_{sk}) + (E_{res} + C_{res}) \quad (1.36)$$

- En plus de cela, FANGER ajoute les expressions de la température moyenne cutanée et celle du taux de sudation qui sont selon lui les seuls paramètres influençant le bilan thermique aux voisinages de la neutralité thermique. Ces expressions déterminées par Rohles et Nevins, sont respectivement

$$T_{sk} = 35,7 - 0.028(M - w) \quad (1.37)$$

$$E_{rsw} = 0.42(M - w - 58.15) \quad (1.38)$$

Par conséquent, la charge thermique de l'individu s'exprime par les relations (1.39), (1.40),

T_{cl} étant la température de surface externe du vêtement, f_{cl} le facteur d'habillement, h_c le coefficient d'échange convectif qui dépend du mouvement de l'air autour du corps et aussi de la posture de l'activité, T_a, T_r respectivement les températures de l'air ambiant et la température moyenne radiante des parois.

$$\begin{aligned}
L = & (M - w) - 3.0510^{-3}(5733 - 6.99(M - w) - P_a) - 0.42(M - w - 58.15) \\
& - 0.0014M(34 - T_a) - 1.710^{-5}M(5867 - P_a) \\
& - 3.9610^{-8}f_{cl}(T_{cl}^4 - T_r^4) - f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)
\end{aligned}
\tag{1.39}$$

L est la charge thermique de l'individu

T_{cl} est la température de surface externe du vêtement et qui est solution de l'équation suivante :

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - w) - 0.155I_{cl}(3.9610^{-8}f_{cl}(T_{cl}^4 - T_r^4) + f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a))
\tag{1.40}$$

Ces relations ont été déterminées à partir des expériences conduites dans des ambiances bien contrôlées en température et en humidité relative avec différentes populations vêtues de différentes manières et ayant différentes activités. Celles-ci devraient fournir des informations concernant leur sensation thermique à partir d'une échelle ASHRAE de sensation thermique

A partir des votes de sensation thermiques recueillis des enquêtes, FANGER a défini le vote de confort moyen comme étant la moyenne des votes émis par un ensemble de participants aux enquêtes dans des conditions climatiques données. Il l'a dénommé le PMV (Predicted mean vote) en anglais ou le vote moyen prévisible en français.

Pour mener à bien ces études, FANGER, a lié la valeur du bilan thermique au vote de confort moyen exprimé par les sujets (au total 1300 personnes) à des conditions thermiques données. Il a obtenu la relation suivante :

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)L
\tag{1.41}$$

Lorsque le bilan est nul, le PMV est aussi nul et le métabolisme est égal aux pertes thermiques du corps humain. La situation de confort devient alors optimale.

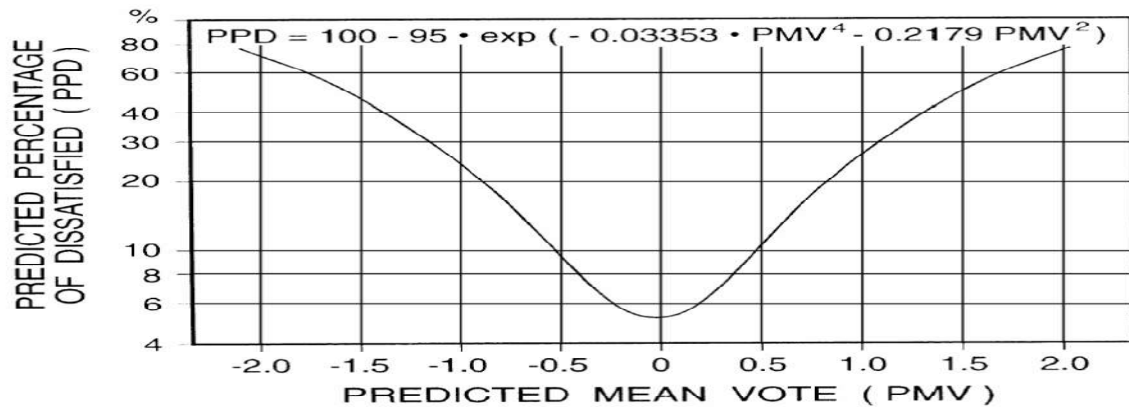


Figure 1-1 : Variation du PPD en fonction du PMV

FANGER a réalisé une étude statistique du groupe d'individus ayant participé à son enquête. Il en déduit le pourcentage de personnes insatisfaites dans l'ambiance étudiée et qui voteraient

-3, -2, 2 et 3. Ce pourcentage d'insatisfaits est relié au PMV (équation 1.42), le vote moyen prévisible. Cette relation prévoit un minimum de pourcentage des insatisfaits de 5% pour un vote zéro, puis ce pourcentage augmente de façon symétrique de part et d'autre du vote zéro vers les sensations chaude ou froide.

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (1.42)$$

De tout ce qui précède, on peut conclure que le PMV de FANGER est calculé à partir de six paramètres dont deux sont physiologiques (activité et la vêtue des sujets) et 4 physiques caractérisant l'ambiance. Ce sont la température ambiante de l'air, la vitesse de l'air ambiant, la température radiante moyenne et l'humidité relative.

I.5 Forces et Faiblesses de l'approche analytique de FANGER

L'approche de FANGER a le mérite d'utiliser une équation du bilan thermique du corps humain. Ceci lui permet de prendre en compte les caractéristiques physiques du microclimat intérieur des bâtiments et les caractéristiques des occupants. Cependant, elle paraît plus complexe, mais met en évidence les processus physiques qu'incarne le comportement du système Homme-Ambiance, objet de l'étude du confort. Sa complexité est bel et bien discutable puisqu'il existe des abaques et des programmes faciles à élaborer (voir

chapitre 2) pour le calcul des indices PMV/PPD de cette approche. Cette approche convient mieux aux ambiances climatiques bien contrôlées. Par conséquent son utilisation à des bâtiments climatisés pourrait donner de bons résultats.

Le calcul du PMV nécessite la connaissance avec exactitude de la vêtue et de l'activité. Ces deux paramètres pourraient introduire des erreurs s'ils ont été mal appréciés. Faudrait-il remarquer aussi que les vêtements ne sont pas portés seulement pour des questions de confort, mais d'autres facteurs comme la mode, la culture, interviennent et spécifier une valeur d'isolation peut être source d'erreur d'appréciation du confort.

Dans les bâtiments non climatisés où la température interne est un reflet de la température extérieure du bâtiment, le PMV de FANGER surestime la sensation thermique surtout en climat chaud (on le verra dans le chapitre suivant). Les enquêtes menées par Dear et Brager (1998) dans des locaux non climatisés révèlent les mêmes constats : la température de confort observée lorsque la température extérieure est de 30°C est 1.5°C plus élevée que celle prévue par les indices de FANGER.

Nicols et Humphreys (2002) ont montré dans leurs travaux que les calculs du PMV/PPD basés sur des mesures faites dans des conditions stationnaires ne sont pas applicables aux bâtiments non climatisés car ici l'ambiance n'est plus stationnaire mais transitoire du fait de la variation de certains paramètres dans le temps. Evidemment, dans un bâtiment naturellement ventilé, la vitesse de l'air ambiant n'est pas souvent contrôlable et l'air peut à tout moment entrer dans le bâtiment et à différentes vitesses !!! En 1973, ils montrent que la non-conformité du PMV de FANGER aux sensations actuelles pourrait s'expliquer par les capacités d'adaptation du corps humain.

I.6 Approche adaptative du confort thermique des bâtiments

En effet le modèle du confort de FANGER qui fait appel à l'équilibre thermique du corps humain dépend des paramètres à savoir la température ambiante, la vitesse de l'air ambiant, l'activité physiologique, la résistance vestimentaire, l'humidité relative et la température rayonnante des parois et s'appuie sur l'état stationnaire du comportement humain avec son environnement. Le confort adaptatif quant à lui est une approche qui prend en compte l'état dynamique de ce comportement humain et son environnement et consiste à faire réagir dans une situation d'inconfort, le corps humain pour restaurer d'une certaine façon le confort (Humphreys & Nicols, 1998). Evidemment, les interactions entre l'homme et son environnement ne se limitent pas qu'aux échanges thermiques et /ou au transfert de masse. Dans une ambiance donnée, l'homme a la possibilité d'analyser sa situation actuelle et peut décider d'entreprendre des actions lorsqu'il constate un écart par rapport à ses attentes et ses aspirations. Ces actions pour la plupart visent à l'adapter à l'ambiance dans laquelle il se trouve ou à adapter l'ambiance à sa convenance. Ce sont ces types d'action conscientes ou non qui feront que le confort thermique du bâtiment décrit par des méthodes analytiques telles que le modèle de FANGER, se révèle inadéquat dans certaines situations d'ambiance. C'est ce que veulent corriger les adeptes du confort adaptatif en mettant en évidence l'écart entre les résultats du confort prédit par des modèles analytiques et les mesures sur le terrain (Humphreys et Bragger, 1998). De ce fait, le confort adaptatif augure d'une certaine flexibilité dans la correspondance entre la température interne de confort thermique optimal des bâtiments et celle de l'extérieur particulièrement pour les bâtiments naturellement ventilés (de Dear and Bragger, 2002, Humphreys et al, 2007; Kwok and Rajkovich, 2010; Nicol and Humphreys, 2002).

I.6.1 Les composantes du confort adaptatif

Le confort adaptatif a trois composantes qui peuvent être simultanées et sont :

- L'adaptation physiologique
- L'adaptation psychologique
- L'adaptation comportementale.
- L'adaptation physiologique permet de maintenir la température du corps humain à un niveau confortable, et fait intervenir les phénomènes de perspiration, de vasoconstriction et de vasodilatation. Cette adaptation physiologique est souvent acquise par un héritage ou patrimoine génétique de l'individu. L'acclimatation qui fait aussi partie de ce type d'adaptation physiologique, n'est pas prise en compte non plus par l'équation de la charge thermique du corps humain décrite par FANGER. Dans l'organisme, l'acclimatation est le fait d'une liaison rétroactive inconsciente obtenue par l'intermédiaire du système nerveux qui affecte le système physiologique de la thermorégulation. Elle caractérise les changements physiologiques dus à une exposition prolongée dans un environnement thermique. L'adaptation génétique, plus grande partie de l'adaptation physiologique est cependant différente de l'acclimatation du fait qu'elle est observée sur toute la durée de vie de l'individu.
- L'adaptation psychologique est non mesurable et décrit la sensation thermique à partir des expériences passées. En effet, l'expérience thermique et la mémoire de l'individu affectent la sensation thermique par les attentes et les habitudes. Une personne qui aurait séjourné dans une ambiance de forte chaleur (35°C par exemple) pendant 7 jours, ne va-t-elle pas trouver froide une ambiance de 29°C le 8^{ème} jour ? Evidemment, la mémoire de cet individu a enregistré la température de 35°C comme confortable et ses attentes issues du passé sont celles d'une ambiance chaude. De la même manière, une personne d'une région

tempérée qui est placée dans une région tropicale pour plus d'un an commencera à s'adapter ou s'habituer au climat tropical et par conséquent pourra perdre sa sensation de la chaleur et de ce fait deviendra plus réceptive au froid qu'à la chaleur. La sensation thermique du corps humain à la chaleur est ainsi réduite du fait de son exposition au-delà d'un an dans une ambiance thermique tropicale. Evidemment, comme on le dit en psychophysiologie, l'exposition répétée à un stimuli diminue l'intensité de la réponse. Dans l'approche statique de FANGER du confort thermique, l'adaptation psychologique n'est pas pris en compte du fait qu'il a été supposé que le stress psychologique et la sensation thermique est constante.

- L'adaptation comportementale est considérée comme l'ensemble des actions à mener par un individu d'une ambiance donnée pour obtenir un confort thermique en modifiant le flux d'énergie échangé avec son environnement. Ces actions peuvent être divisées en trois groupes : les actions ou ajustements personnels (modification de la vêtue, de l'activité physique, consommation de nourritures et boissons chaudes ou fraîches, déplacement vers une autre ambiance), technologiques (ouverture ou fermeture des fenêtres, mise en marche d'un brasseur d'air, d'une climatisation, d'un chauffage...), ou socioculturels (sieste aux heures chaudes).

La résistance vestimentaire, l'activité ou le métabolisme et la vitesse de l'air étant considérés comme des adaptations comportementales, certains chercheurs ont d'ailleurs déterminé une relation mathématique qui en fait est le résultat des mesures in situ d'une part entre la vêtue et la température et d'autre part entre la vitesse et la température.

$$I_{cl} = -0.04T_{op} + 1.73 \quad \text{par Dear et Brager (1.43)}$$

$$v = 0.03T_{op} - 0.56$$

$$Icl = -0.04T_{op} + 1.76 \quad \text{par Mui et Chan} \quad (1.44)$$

$$v = 0.02T_{op} - 0.35$$

$$Icl = -0.0352T_{globe} + 1.3875 \quad \text{par Bouden et Ghrab} \quad (1.45)$$

La méthodologie du modèle adaptatif comme nous l'avions vue plus haut est obtenue par des mesures in situ et établie à partir des questionnaires et des mesures de température, de la vitesse d'air ambiant et de l'humidité relative, s'exprime par une corrélation linéaire entre la température idéale de confort à l'intérieur d'un immeuble et la température de l'extérieur.

Les études faites par Mui et Chan en climat subtropical à Hong Kong à partir des mesures dans 29 bureaux en été et 26 en hiver, ont montré que le domaine d'acceptabilité de température est compris est de 20.8-25.0°C et 19.5-21.5°C pour respectivement les périodes d'été et d'hiver. Cependant la température de confort idéal est de 23.7°C en été et de 21.2°C en hiver. La régression linéaire entre la température extérieure et la température de confort idéale est la suivante :

$$T_n = 18.303 + 0.158T_{ext} \quad \text{avec } R^2 = 0.59 \quad (1.46)$$

D'autres études ont été faites dans cinq villes de climat tropical du PAKISTAN (voir tableau 1.11) . Plus de 34 bâtiments ont été étudiés. Parmi eux, un seul bâtiment était climatisé. Le reste des bâtiments fonctionnaient avec une ventilation naturelle. La valeur moyenne du métabolisme dans ces bâtiments varie entre 1.11 et 1.25 met. La régression linéaire entre la température extérieure et la température de confort idéal est la suivante :

$$T_n = 18.5 + 0.36T_{ext} \quad \text{avec } R^2 = 0.73 \quad (1.47)$$

Tableau 1.11. Différents climats au Pakistan

5 Villes du Pakistan	Climat	température moyenne mensuelle extérieure (°C)
Karachi	Tropical côtier	18.1-31.4
Multan	sub tropical continental, basse terre aride	12.8-35.5
Quetta	Sub-tropical continental, haute terre semi-aride/ sub-humide	4.9-27.8
Islamabad	Sub-tropical continental, basse terre sub humide	10.1-31.2
Saidu Sharif	Sub-tropical continental haute terre humide	8.2-28.7

Plusieurs autres études ont été faites en utilisant soit la moyenne des températures mensuelles extérieures, soit la moyenne des températures journalières extérieures, soit des moyennes pondérées des températures extérieures des 7 jours précédents le jour des enquêtes ou de la simple moyenne arithmétique des températures des 7 jours précédant le jour des enquêtes.

Tableau 1.12 : Equations de confort en climat chauds et humides

Température extérieure	Climat tropical et Humide		
	Equation (confort adaptatif)	R ²	Significativité statistique
moyenne journalière T _{exjm}	$T_n = 0.57 T_{exjm} + 13.8$	0.64	***
moyenne mensuelle T _{exmm}	$T_n = 0.53 T_{exmm} + 14.5$	0.51	***
moyenne glissante T _{exmg}	$T_n = 0.55 T_{exmg} + 14.2$	0.54	***
simple moyenne glissante T _{exms}	$T_n = 0.54 T_{exms} + 14.6$	0.53	***

A partir des enquêtes, HUMPHREYS (1978) a déterminé la corrélation entre la moyenne mensuelle des températures extérieures et la température de confort à l'intérieur d'un immeuble qu'il soit naturellement ventilé ou climatisé. Selon son étude, il a été remarqué que l'influence du climat extérieur est moins marquée sur les immeubles climatisés que sur les immeubles naturellement ventilés. Cependant des études supplémentaires ont montré que les corrélations existant entre les températures de confort corrélées à une moyenne pondérée des températures extérieures (moyenne glissante) T_o sont plus précises que celles qui prennent en compte la moyenne mensuelle (Nicol et Rja, 1996)

$$T_c = 11.5 + 0.534T_o \quad (1.48)$$

I.6.2 Conditions d'utilisation de l'approche adaptative

Selon la norme EN 15521 (CEN), les recommandations stipulent l'approche analytique utilisant le modèle de FANGER (PMV-PPD) pour étudier le confort thermique des immeubles. Pour les bâtiments non climatisés, un choix optionnel peut être fait par l'utilisation de l'approche adaptative, à condition que les immeubles respectent les conditions suivantes :

- Les occupants doivent avoir des activités ayant un métabolisme compris entre 1 et 1.3met
- Les personnes de l'immeuble ne doivent pas s'habiller de la même façon ou plus précisément il ne doit pas être exigé une façon stricte de s'habiller à l'intérieur de l'immeuble afin de permettre aux occupants d'adapter leur isolation thermique à leur guise.
- Les bâtiments doivent être équipés de fenêtres facilement ouvrables sur l'extérieur, afin de permettre aux occupants d'adapter leur sensation thermique à leur attente tout en ayant la possibilité d'ajuster l'ouverture des fenêtres. Dans les espaces paysagés où la plupart des occupants ont seulement un accès limité aux fenêtres ouvrables, l'approche adaptative ne doit pas être appliquée. Une exigence supplémentaire est qu'il y ait moins de quatre personnes par pièce.
- Aucune climatisation ne doit être en fonctionnement dans l'espace, l'ouverture des fenêtres devant rester le seul moyen essentiel pour la régulation des conditions thermiques. Cependant cela n'entrave pas l'utilisation de tous les moyens relatifs mettant en avant les méthodes à basse énergie permettant un contrôle individuel de l'ambiance intérieure comme des ventilateurs, des volets, la ventilation nocturne.

Forces et faiblesses de l'approche adaptative du confort thermique des bâtiments

Une des forces de l'approche adaptative est l'utilisation de modèles empiriques très simples. La connaissance de la température extérieure suffit pour déterminer la température de confort à l'intérieur du bâtiment. Cependant, les modèles de confort obtenus à partir des régressions linéaires ont souvent de très faibles valeurs de coefficient de corrélation et il se pose la question de l'utilisation de ces modèles à partir d'un nombre restreint d'observations pour une généralisation. Le confort adaptatif ne prenant pas en compte tous les paramètres physiques qui déterminent le microclimat à l'intérieur des

bâtiments, ne pourrait-on pas ainsi dire que les climats chauds et humides des pays d'Afrique sont systématiquement confortables ou inconfortables, la température extérieure dont dépendent les modèles de confort étant la même le jour et la nuit dans ces régions? Faudrait-il aussi remarquer que du fait de la multiplicité des équations de confort, plusieurs températures de confort issues de ces modèles peuvent ne pas être en adéquation avec celle mesurée sur le terrain !! Des cinq différents modèles testés à la HAVANE, seul celui de Humphrey's and Nicol augure une concordance avec les résultats du terrain (voir tableau 1.5) .Ne pourrait- on pas attribuer cette différence à la faiblesse des coefficients R^2 de régression linéaire ? L'utilisation de cette approche, limitée à 4 personnes par pièce ne remet-t- elle pas en cause, les résultats obtenus par certains chercheurs et quelle approche faudrait-il adopter pour les ambiances publiques comme les salles de classe? Quel serait l'effet de l'humidité relative en climat tropical et humide des pays d'Afrique?

I.7 Conclusions

En climat chaud et humide, les conditions de confort, obtenus sur site sont en inadéquation avec celles prédites par les normes internationales. L'approche la plus utilisée pour les bâtiments naturellement ventilés est celle du confort adaptatif qui en lui-même présente certains inconvénients comme ceux énumérés ci – dessus et surtout, la faiblesse des coefficients de corrélation des régressions linéaires permettant d'évaluer les températures de confort.

En Afrique sub-saharienne et plus précisément au Bénin, très peu d'investigations ont été faites. Les caractéristiques des climats chauds et humides n'étant pas les mêmes partout, la problématique du confort reste encore posée et sa résolution doit précéder toute action visant un changement de comportement pour une efficacité énergétique des bâtiments dans la bande côtière du Bénin.

En définitive, plusieurs études ont porté sur l'invalidité du modèle du PMV de FANGER en climat chaud et humide, mais rares sont les travaux qui portent sur son adaptabilité à ces conditions climatiques du fait de son caractère rationnel !. Le confort adaptatif ne prenant pas en compte l'humidité relative, une source d'inconfort en climat chaud et humide, le prochain chapitre de nos travaux, se penchera sur la question tout en élaborant une tentative de solution à l'adaptation du modèle PMV de FANGER à la bande côtière du Bénin, région de climat chaud et humide.

CHAPITRE 2 : ETUDE DU CONFORT THERMIQUE DANS LES BATIMENTS DE LA BANDE COTIERE DU BENIN

II.1 Introduction

La demande en énergie dans le bâtiment, ayant connu ces dix dernières années au Bénin, un accroissement important du fait de l'évolution de la démographie en région urbaine et des conceptions architecturales mal adaptées au climat, l'efficacité énergétique des bâtiments devient alors un enjeu crucial au gouvernement, surtout en ces temps de renchérissement du prix des produits pétroliers et du changement ou de réchauffement climatique. Cette efficacité énergétique, passe par la garantie d'un meilleur niveau de confort thermique dans le bâti, par l'utilisation d'une climatisation passive ou d'une consommation optimale de l'énergie électrique pour une climatisation active. Dès lors, une appréciation du confort au Bénin et plus précisément dans la bande côtière du Bénin, région à climat chaud et humide s'impose.

Comme nous l'avons exposé au chapitre précédent, les approches de confort thermique des bâtiments les plus utilisées étant celle du confort adaptatif et celle rationnelle de FANGER, nous avons choisi d'utiliser la méthode de FANGER du fait des limites d'utilisation qu'impose l'adaptatif d'une part et d'autre part pour faciliter les calculs numériques qu'imposerait l'étude de l'impact du vitrage sur le confort thermique, objet de notre thèse.

Selon l'ASHRAE et la norme ISO 7730, on peut déterminer les conditions de confort en zone tempérée par le calcul du PMV [FANGER, 1970], indice de confort permettant de prévoir la valeur moyenne des expressions subjectives de confort d'un groupe de personnes dans une ambiance donnée. Cet indice s'étale sur une échelle de 7 points entre très chaud (+3) et très froid (-3) (voir chapitre 1).

Depuis le développement de ce modèle, plusieurs études sur le confort thermique ont été faites. La plupart a comparé le vote de sensation thermique actuelle dans une ambiance à la sensation thermique prévue par le calcul du PMV. Parmi celles-ci, nous pouvons citer les travaux de Becker et autres,

2003 ; Hien et Tanamas, 2002; Bellayat et autres, 2002 ; Mallick, 1994 ; Auliciems, 1977; Auliciems & de Dear, 1986 ; Baillie, Griffiths & Huber, 1987 ; Bragger et al, 1994 ; Bussch, 1992 ; Cena & de Dear, 2001; Cena, Spotila & Ryan, 1988 ; Croome, Gan & Abwi, 1992 ; de Dear & Auliciems, 1985 ; de Dear, Leow & Ameen, 1991 ; Donnimi, Molina, Martello, Feriadi, Wong 1992.....

Particulièrement, Doherty et Arens (1988) [28] ont montré à travers leurs travaux que la différence entre le PMV prédit par le modèle de Fanger et le vote réel de sensation thermique peut atteindre une valeur 1.3 sur l'échelle ASHRAE. De la même manière Humphreys (1994) a constaté dans ses travaux, que les températures de confort idéal mesurées dans des chambres climatiques peuvent être inférieures de 0.8°C ou supérieures de 3°C à celles prédites par le modèle PMV de confort de Fanger.

Comme l'a remarqué E. Rajasekar et A. Ramachandraiah en climat tropical et humide [29], le modèle PMV de FANGER surestime le confort thermique, et caractérise systématiquement d'inconfortable, les ambiances de température supérieure ou égale à 30°C et d'humidité relative supérieure à 70% qui en réalité pourraient ne pas l'être pour les populations de ces régions.

En effet, la température ambiante pouvant atteindre des valeurs instantanées de 32°C et l'humidité relative supérieure à 70% dans la bande côtière du Bénin, cette partie de nos travaux a pour objectif de nous fixer sur l'adéquation ou non du modèle de FANGER à cette région.

II.2 Critères de choix des bâtiments tests.

Les bâtiments, objets de notre étude sont des bâtiments à fenestration en vitre, implantés dans la bande côtière du Bénin.

Le Bénin étant divisé en plusieurs microclimats, nous avons choisi de faire notre étude dans sa bande côtière. Située entre le 1°41'58'' – 2°42'49'' de

longitude Est et 6°31'40'' de latitude Nord, cette bande côtière sablonneuse est limitée par des lacs, marécages et l'océan Atlantique. Tout ceci offre à cette région un fort taux d'humidité relative.

Pour une meilleure étude de l'impact de la fenestration en vitre sur le confort thermique des bâtiments, nous avons opéré un choix parmi les bâtiments entièrement vitrés, pour une meilleure analyse thermique et étudié l'effet des rayonnements solaires sur ces types de bâtiments en région tropicale et humide. Parmi les bâtiments entièrement vitrés de la région nous avons choisi celui d'une institution financière. Les études thermiques, performances énergétiques et environnementales ont été réalisées sur ce bâtiment se trouvant à Cotonou.

Par ailleurs, des bâtiments avec des baies vitrées, plus précisément les bureaux du rectorat d'Abomey Calavi, les laboratoires et salles de l'Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi ont été aussi choisis pour les campagnes de mesures afin d'en étudier le confort thermique.

Le choix de ces bâtiments s'est fait essentiellement en fonction des critères suivants :

- Accessibilité : Accessible sans restriction à tout moment pendant toute la période de la thèse
- Fonctionnalité : Facilité d'utilisation des appareils de mesure, facilité de lecture et disponibilité des différents plans d'architecture
- Représentativité : exemple typique d'habitat et d'un type de technique moderne de construction.

Le bâtiment entièrement vitré correspond de par son système de construction au plan matériel (mur en briques, double vitrage, ...). Certaines conclusions faites sur ce type de bâtiment presque entièrement vitré, dans cette région de climat chaud et humide, ont été généralisées aux bâtiments ayant une surface vitrée moindre. On le verra dans la suite de nos travaux lors de l'amélioration des conditions de confort thermique, l'extrapolation et la généralisation à partir des résultats de nos observations doivent tenir compte de la nature du

bâtiment test, (détails constructifs), de son voisinage et de la nature de la sollicitation enregistrée. Une comparaison immédiate entre la réponse enregistrée d'un bâtiment du même type que notre bâtiment test ne sera possible que si ce dernier est vitré et se trouve dans le même environnement que le bâtiment test. La validité de nos résultats est garantie grâce à l'utilisation du logiciel TRNSYS, logiciel d'utilisation universelle en énergétique dans le bâtiment.

Dès lors, les restrictions de la validité de nos résultats ne seront que fonction de la robustesse et la fiabilité des équipements, de la position des équipements de mesure et leur interaction avec le voisinage. Les mesures ont été effectuées chaque fois que le besoin s'en faisait sentir. Cependant, de manière régulière et systématique, les enquêtes et mesures ont été faites tous les jours durant nos différents séjours au Bénin.

Le bâtiment avec des baies vitrées choisi correspond aux bureaux administratifs de la période post coloniale et des petites salles de cours et de travaux pratiques de l'Ecole

Polytechnique d'Abomey Calavi de par leur dimension.

II.3 Présentation du climat de la région côtière du Bénin à travers la température, l'hygrométrie et la vitesse du vent ...

Les villes d'ABOMEY CALAVI et COTONOU où sont installés nos bâtiments test appartiennent à une zone bénéficiant du climat de type tropical et humide. Avec une forte humidité relative de 75% en moyenne par an, ces villes sont caractérisées par deux saisons sèches respectivement de novembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre et par deux saisons de pluies d'avril à mi-juillet et de mi-septembre à octobre.

II.3.1 La température de l'air

La température moyenne de l'air ambiant au Bénin est de 26°C. Au niveau d'ABOMEY CALAVI et COTONOU, la température de l'air ambiant atteint sa valeur moyenne maximale de 28,7°C au mois de mars et minimale de 24,4°C au mois d'août, mois supposé être le plus froid de l'année.

Au mois de janvier où souffle le vent froid sec (l'harmattan), on enregistre une température moyenne de 26, 1°C

II.3.2 Le vent

Dans les bâtiments, la vitesse de l'air conditionne les échanges thermo-convectifs entre l'homme et l'air ambiant d'une part et entre l'air et les parois des locaux d'autre part. Le vent constitue donc un facteur très important dans la conception de l'habitat car il affecte le confort des occupants, dirige les précipitations et modifie les échanges par convection sur l'enveloppe des constructions.

En région tropicale humide, le vent est utilisé pour le refroidissement de l'enveloppe du bâtiment et l'amélioration des conditions d'ambiance dans les locaux.

II.3.3 Les précipitations

La fréquence et la nature des précipitations dans une région géographique donnée, sont des caractéristiques importantes de son climat. Elles dépendent du mouvement des vents et des masses d'air humide. Les précipitations constituent un apport d'humidité non négligeable qui va généralement de pair avec la diminution des sollicitations thermiques. A Cotonou et à ABOMEY CALAVI, la répartition annuelle est marquée par deux saisons sèches et deux saisons de pluie. La valeur moyenne minimale des précipitations observées, à Cotonou et ABOMEY CALAVI est au mois de janvier et est de 12,2 mm. La figure 2-1 montre l'évolution dans l'année des précipitations à Cotonou et à Abomey Calavi.

II.3.4 L'humidité relative

L'humidité de l'air peut s'exprimer de différentes manières : pression (tension) de vapeur d'eau P_v , humidité absolue H_a ou relative RH . Exprimée en pourcentage, l'humidité relative RH représente la distance entre l'état actuel de l'air et son point de saturation. Elle augmente en région humide, pour diminuer en région sèche. Les moyens d'action naturels sur l'humidité sont très limités. Elle est une variable climatique que l'on subit et sur laquelle toute action directe sans consommation d'énergie est pratiquement difficile.

L'humidité de l'air joue un rôle important au niveau des échanges de chaleur cutanés par sudation et des échanges de chaleur par les voies respiratoires. Il est bien connu que l'air sec et chaud entraîne l'assèchement de la peau, tandis que l'air humide et chaud se traduit par une production intense de sueur et de dessèchement de la gorge.

Le degré hygrométrique de l'air est un facteur important dans la recherche des solutions du confort thermique et les effets d'inconfort générés par une humidité de l'air peuvent être atténués par la ventilation efficace des locaux.

La proximité de Cotonou ou ABOMEY CALAVI de l'océan atlantique, a une influence beaucoup plus importante sur l'humidité de l'air dans ces villes qu'ailleurs au Bénin. L'humidité relative moyenne de ces villes varie entre 73,5% à 84,1%. Dans ces villes, le plus bas taux d'humidité de l'air est observé au mois de janvier de chaque année, période où souffle le vent froid sec, l'harmattan

COTONOU et ABOMEY CALAVI étant situées dans la zone la plus humide du Bénin, l'inconfort thermique résultant de la combinaison de fortes valeurs d'humidité et de température est la source principale d'inconfort dans l'habitat dans la bande côtière du Bénin. La ventilation des locaux constitue une des principales solutions pour améliorer les conditions d'ambiance et restituer les conditions de confort thermique dans les habitations dans ces villes en conurbation.

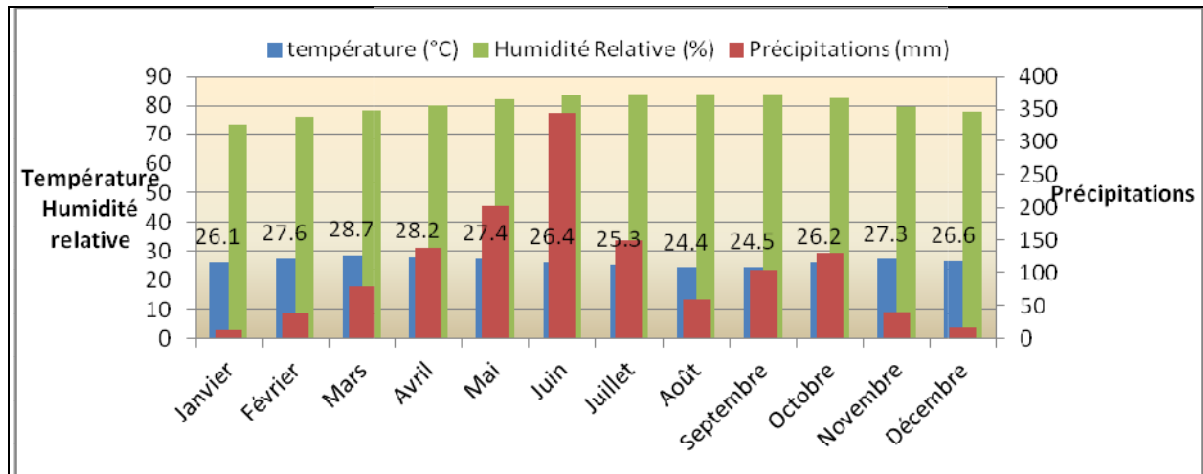


Figure 2-1 : Présentation du climat de la bande côtière du Bénin

II.4 Description de ces bâtiments

II.4.1 Bâtiments à baies vitrées

Les bâtiments à baie vitrée identifiés présentent une structure en béton et des murs épais. Les façades extérieures sont ombragées par des arbres plantés le long de l'immeuble. Les fenêtres vitrées sont fermées durant toutes nos expériences et présentent pour la plupart des stores pour limiter avec les ombrages créés par les arbres, l'impact des rayonnements solaires. Tout ceci doit bel et bien avoir une incidence sur l'inertie thermique du bâtiment. Du fait de cette inertie du bâtiment, on s'attend à un avantage au profit du climat interne, alors qu'en pratique du fait du climat extérieur chaud et humide, le confort dans ces bâtiments est souvent détérioré. Le bâtiment à baie vitrée choisi, correspond aux bâtiments administratifs de la région sud du Bénin. Ces caractéristiques sont les suivantes (voir tableau 2-1).

Tableau 2-1 : Caractéristiques des bureaux individuels

	Volume (m ³)	Surface des parois (m ²)	Portes (m ²)	Parois (nombre)	Fenêtr e (m ²)	Sol ou Dalle (m ²)
B1	26.50	37.60	1.75	5	2.53	8.53
B2	23.58	33.05	1.71	4	7.04	8.36
B3	20.46	29.72	1.72	4	1.80	7.75
B4	23.05	31.11	1.71	4	1.18	8.83
B5	28.09	33.79	1.78	4	1.82	10.4
B6	33.58	37.89	1.80	4	4.09	12.67
B7	22.04	30.67	1.80	4	4	8.35
B8	23.34	31.45	1.76	4	3.14	8.87
B9	61.35	56.28	2.21	4	5.23	19.29
B10	35.85	38.96	1.80	4	4.38	13.58
B11	26.71	33.81	1.78	4	1.60	10.08



Figure 2-2 : Bâtiments à baies vitrées (rectorat UAC)



Figure 2-3 : Bâtiment à baies vitrées (EPAC-UAC)

II.4.2 Bâtiment entièrement vitré

Le bâtiment entièrement vitré est une partie d'un immeuble à 4 étages. Les conditions d'accès et les plans mis à notre disposition ont fait que nous nous sommes intéressés au rez de chaussée et au premier étage.



Figure 2-4 : Immeuble test (Bâtiment entièrement vitré)

Les façades supérieures et postérieures du bâtiment sont toutes deux entièrement vitrées ; ces vitres sont soutenues par des murs externes

composés de briques pleines recouvertes d'un matériau en aluminium (alucobond). Entre les briques pleines et le matériau en aluminium, se trouve une lame d'air d'épaisseur de 0.040m.

Quant au sol, il est composé d'un carrelage, d'un mortier et d'une dalle. Le plafond est quant à lui composé de plâtre, d'une lame d'air, du béton lourd et du carrelage.

Les murs internes sont composés quant à eux de plâtre d'épaisseur de 0.015m, de briques pleines de 0.090m d'épaisseur, de granite de 0.015m d'épaisseur

II.4.2.1 Rez de chaussée

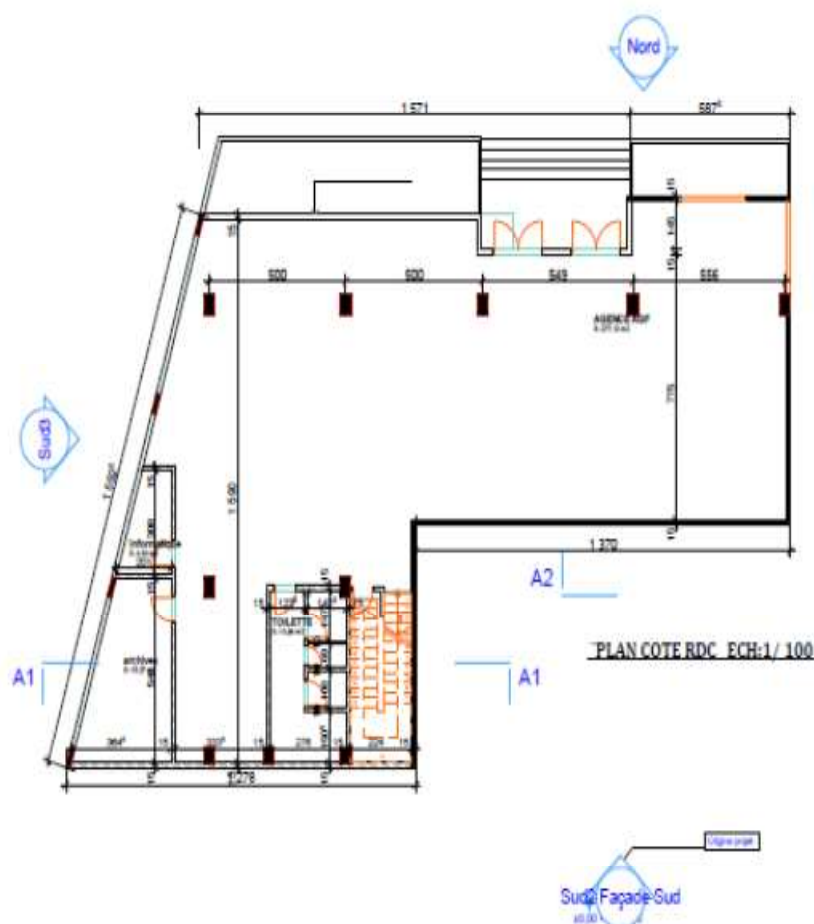


Figure 2-5 : Plan du Rez de Chaussée

Le rez de chaussée est composé d'un grand hall d'une surface $S=277.13\text{m}^2$ et de hauteur 4m, d'une toilette de surface $S1= 13.94\text{m}^2$, d'une salle d'archive de

surface $S_2=15.27\text{m}^2$, d'une salle informatique de $S_3= 4.54\text{m}^2$. Le tableau 2-2 donne quelques précisions de la description du rez de chaussée.

Tableau 2-2. Description du Rez de Chaussée

REZ DE CHAUSSEE	
MURS	DESCRIPTION
Façade supérieure Nord	S : 87.31m^2 protégé par ensemble en châssis+ vitrage $6*12*6$
Façade latérale gauche (Ouest)	S : 69.03 m^2
Façade latérale droite (Est)	S : 65.48m^2
Façade postérieure sud	S: 108.03 m^2
Poteaux $0.40*0.60$	Nombre:10
Poteaux $0.15*0.60$	Nombre: 4
Plafonniers $0.60*0.6$	Nombre: 42
ESCALIER	
Largeur marche	23 marches de 0.29m
Hauteur marche	0.18m

II.4.2.2 Etage

D'un volume de 562.73m^3 , le premier étage est constitué aussi d'un hall et d'une toilette. La surface du hall est de 131.48m^2 .

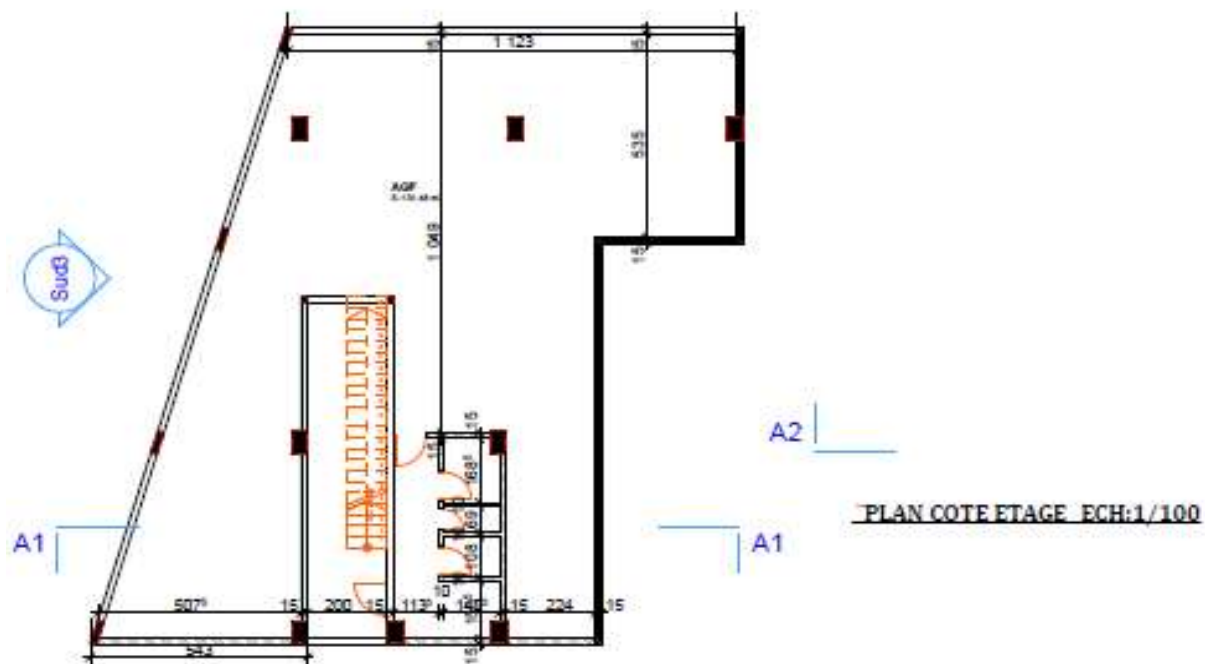


Figure :2-6 : Plan de l'étage

Le tableau suivant donne les informations relatives au mur

Tableau 2-3 : Description de l'étage

1 ^{er} Etage	
MURS	DESCRIPTION
Façade supérieure Nord	S : 87.31m ² protégé par ensemble en chassiss+ vitrage 6*12*6
Façade latérale gauche (Ouest)	S :66.62 m ²
Façade latérale droite (Est)	S : 66.18m ²
Façade postérieure sud	S: 108.03 m ²
Poteaux 0.40*0.60	Nombre: 08
Poteaux 0.15*0.60	Nombre: 4
Plafonniers 0.60*0.6	Nombre: 21
ESCALIER	
Largeur marche	23 marches de 0.29m
Hauteur marche	0.18m

II.5 Application du modèle de FANGER à l'appréciation du confort thermique dans la bande côtière du Bénin

II.5.1 Monitoring

Deux séries d'expérimentations ont été réalisées :

Pour la première série, les mesures sont effectuées au mois de janvier, dans des bureaux d'une personne que nous considérons comme étant des ambiances individuelles qui sont pour la plupart climatisées. Les mesures sont effectuées avec un total de 23 personnes dont 12 femmes, 9 hommes et 2 personnes qui n'ont pas voulu décliner leur identité. L'âge des participants varie entre 26 et 56 ans soit une moyenne d'âge de 44 ans. Il s'agit essentiellement de personnes qui étaient habituées aux bureaux ayant servi aux tests et qui n'ont pas besoin d'une période initiale d'acclimatation. Toutes les personnes testées ont été soumises à un questionnaire dans lequel ils doivent renseigner les informations personnelles comme l'activité et la vêtue. Au moment de l'enquête, des mesures de température, d'humidité et des températures rayonnantes des parois ont été ponctuellement mesurées pendant 20 mn à l'aide de capteurs portables.

Pour la dernière série, les expériences ont été réalisées au laboratoire d'Energies renouvelables et au laboratoire d'informatique de l'Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi. Ce sont des ambiances collectives. Ces salles ont une capacité de 12 à 25 étudiants et présentent une structure en béton. Les façades extérieures sont ombragées par des arbres plantés le long de l'immeuble. Les fenêtres vitrées sont fermées durant toutes les expériences sauf la dernière, et présentent des stores pour limiter avec les ombrages créés par les arbres, l'impact des rayonnements solaires. Ceci permet de supposer une très faible différence entre la température radiante et la température ambiante. Ici, seules la température ambiante et l'humidité relative ont été mesurées. Comme dans le cas de la première série de mesures, les occupants

des ambiances ont été soumis à un questionnaire et doivent aussi renseigner les informations personnelles concernant l'activité et la vêtue. En plus de ces informations, les individus des ambiances collectives doivent renseigner les informations concernant leur sensation thermique qui a été évaluée à l'aide de l'échelle ASHRAE. Au moment des enquêtes, les mesures ont été ponctuellement prises pendant 20 mn à l'aide des capteurs d'humidité et de température. Avant les enquêtes, les étudiants ont séjourné une heure dans les salles afin de s'acclimater à l'ambiance intérieure qui y règne. La valeur moyenne de chaque paramètre mesuré a été calculée. Les valeurs de l'isolation vestimentaire ont été déterminées pour chaque sujet à partir de la liste des pièces vestimentaires selon les valeurs indiquées dans la norme ISO 9920 [AFNOR, 1995]. La résistance thermique de l'habillement a été déterminée par la formule de Olesen (1985) : $I_{cl} = \sum I_{clu,i}$ où I_{cl} est la résistance de l'ensemble de l'habillement et $I_{clu,i}$ est la résistance de chaque composant i de l'habillement. Une moyenne générale de 0,62 clo a été enregistrée pour tous les participants.

Quant aux valeurs du métabolisme, elles ont été calculées à partir de la norme ISO 8996 [AFNOR, 1994]. Les participants aux enquêtes exercent des activités de bureau et sont assis sur des chaises durant les enquêtes, ce qui correspond à une valeur uniforme de 1.2 met soit 70W/m^2 d'activité métabolique sur la table de classification des activités métaboliques de la norme ISO 7730. Pour une activité métabolique uniforme de bureau de valeur 70W/m^2 , il n'y a pas de travail mécanique produit.

Pour les ambiances collectives, six expériences ont été faites au mois de mars, dans six conditions d'ambiance différentes avec différents échantillons d'individus. Les trois dernières expériences ont été faites avec le même échantillon d'individus, mais dans des conditions d'ambiance différentes

II.5.2 Les enquêtes

Les questionnaires [30] d'enquête ont été distribués aux participants au moment des mesures et nous ont permis d'évaluer l'état thermique du personnel ainsi que la qualité de l'environnement intérieur des bâtiments sur des échelles prédéfinies. Ces questionnaires ont aussi permis de récolter les informations sur la vêtue et l'activité des participants afin de calculer les différents indices de confort. Les réponses recueillies ont servi à qualifier l'environnement intérieur des bâtiments du point de vue des occupants, et pour évaluer les indices théoriques du confort thermique en les comparant aux résultats de votes sensoriels et perceptifs des participants. Ces questionnaires ont été d'ordre thermique. Ils comportent une évaluation de l'ambiance thermique à l'aide de l'échelle thermique ASHRAE, en 7 points : -3, -2, -1, 0, 1, 2 et 3, l'estimation de l'activité, et celle de la vêtue.

II.5.3 Comparaison au Modèle de GIVONI

Dans cette partie nous nous sommes intéressés au calcul des indices de confort définis par Fanger à partir des mesures de températures et d'humidité relative dans les bureaux individuels

En observant les figures 2-7 et 2-8, on constate que les occupants des bureaux B3, B5, B9 et B10 ont une résistance vestimentaire respective de 0.87 clo, 0.72clo, 0.76clo et 0.82 clo plus élevée, pour prévenir la sensation de fraîcheur due au vent sec l'harmattan qui souffle d'habitude au mois de Décembre et de Janvier. Par contre ceux des différents bureaux B1, B2, B4, B6, B7, B8 et B11 ont une vêtue de type tropicale ou d'été. Aux bureaux B4 et B10, les portes et fenêtres sont normalement ouvertes. L'ambiance intérieure est alors influencée par le climat extérieur. C'est pour cela que les températures sont ici élevées et ont les valeurs respectives de 31.83°C et 29.25°C. Rappelons ici que nous n'avions pas de capteur de vitesse pour mesurer la vitesse du vent dans les différents bureaux durant la période de nos mesures. Mais il est à noter que

durant nos mesures, l'air était calme dans chacun des bureaux. Pour cela nous avons fait l'hypothèse de faire varier la vitesse de l'air de 0m/s à 1.5m/s.

Tableau 2-3 : Caractéristiques des bureaux individuels

	Volume (m ³)	Surface des parois (m ²)	Portes (m ²)	Parois (nombre)	Fenêtr e (m ²)	Sol ou Dalle (m ²)
B1	26.50	37.60	1.75	5	2.53	8.53
B2	23.58	33.05	1.71	4	7.04	8.36
B3	20.46	29.72	1.72	4	1.80	7.75
B4	23.05	31.11	1.71	4	1.18	8.83
B5	28.09	33.79	1.78	4	1.82	10.4
B6	33.58	37.89	1.80	4	4.09	12.67
B7	22.04	30.67	1.80	4	4	8.35
B8	23.34	31.45	1.76	4	3.14	8.87
B9	61.35	56.28	2.21	4	5.23	19.29
B10	35.85	38.96	1.80	4	4.38	13.58
B11	26.71	33.81	1.78	4	1.60	10.08

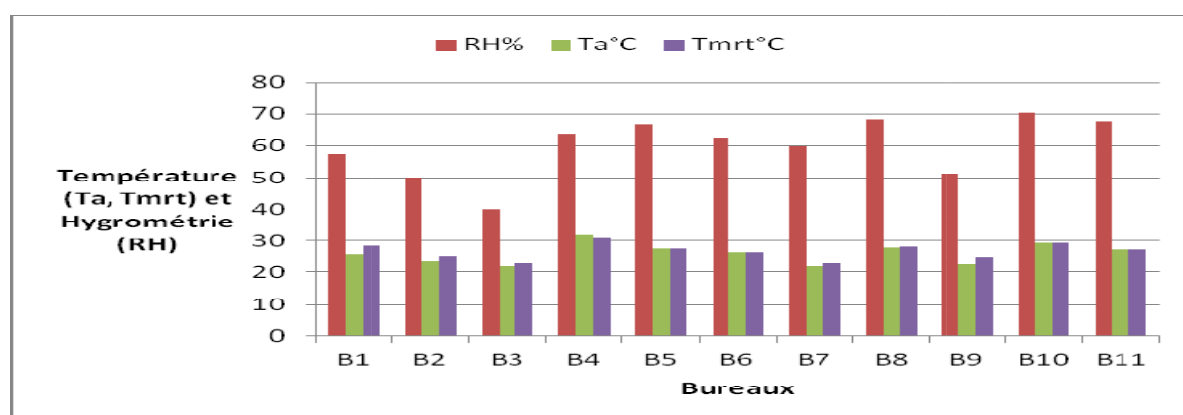


Figure 2-7 : Paramètres mesurés en ambiances individuelles

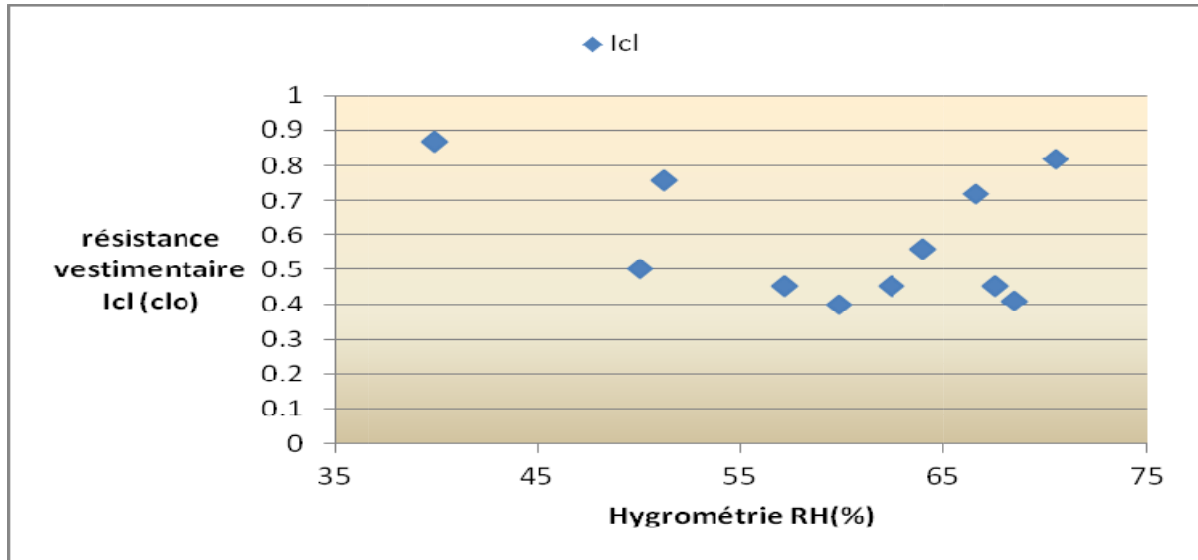


Figure 2-8 : Paramètres mesurés en ambiances individuelles (suite)

II.5.3.1 Modèle mathématique de détermination des indices de confort PMV et PPD

Le modèle mathématique utilisé est celui de l'équation de Fanger repris par Olesen [Olesen BW and Pearsons KC, 198]. Il permet de déterminer les valeurs théoriques des indices PMV et PPD. Il s'agit d'un ensemble d'équations qui prend en compte aussi bien le métabolisme physiologique des occupants d'un bâtiment que des paramètres microclimatiques de l'ambiance (température, humidité et températures rayonnantes des parois de l'ambiance). Ces équations sont regroupées en cinq parties :

$$PMV = (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028) [M - 3.05 \cdot 10^{-3} (5733 - 6.99M - p_a) - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5} M (5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.9610^{-8} f_{cl} ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (2.1)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028M - 0.155I_{cl} [3.9610^{-8} f_{cl} ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (2.2)$$

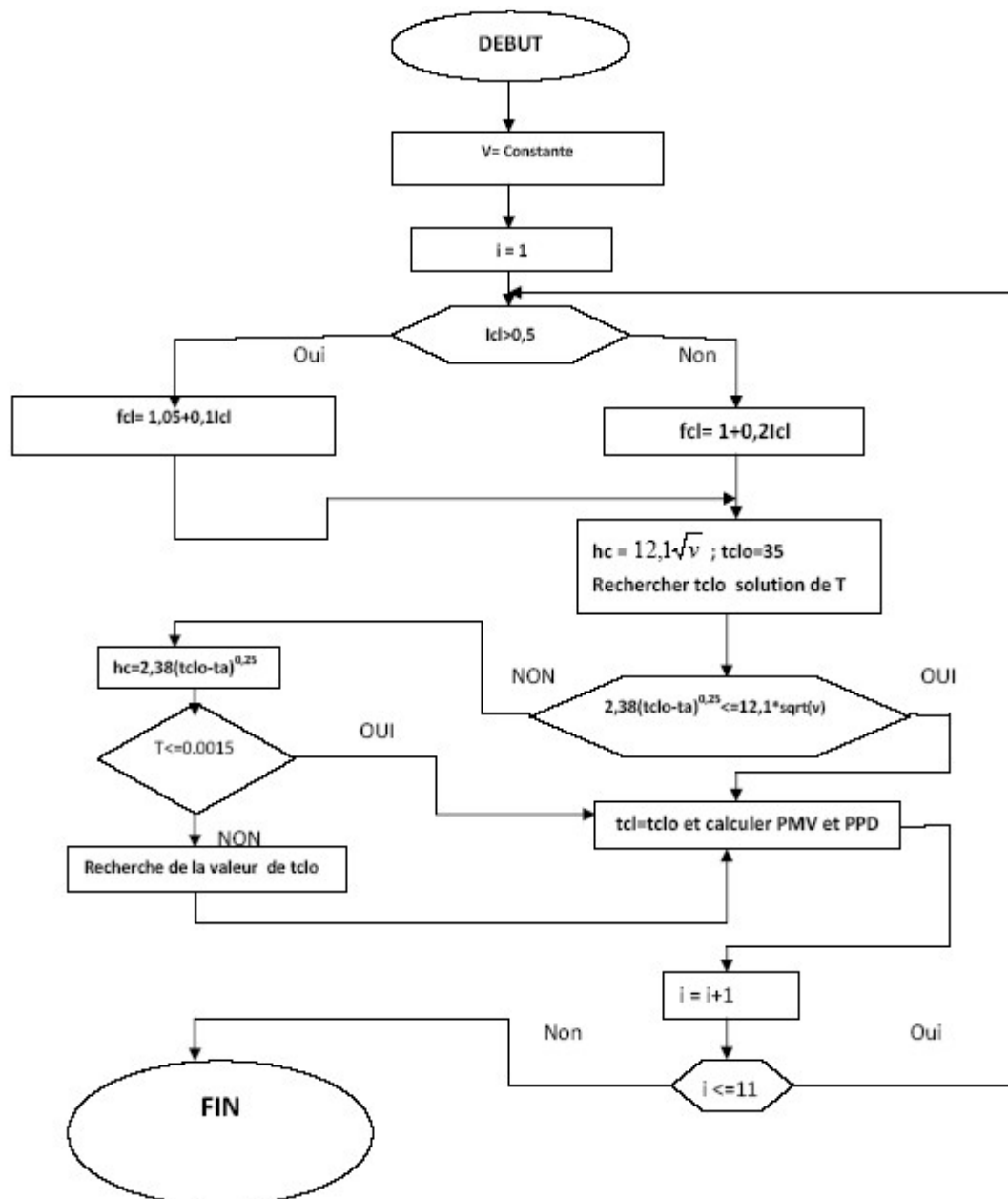
$$h_c = \begin{cases} 12.1\sqrt{v} \text{ si } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1\sqrt{v} \\ 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \text{ si } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2I_{cl} \text{ si } I_{cl} \leq 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl} \text{ si } I_{cl} > 0.5clo \end{cases} \quad (2.4)$$

$$PPD = 100 - 95 e^{-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \quad (2.5)$$

Le calcul des indices PMV et PPD a été fait à l'aide de l'algorithme que voici

II.5.3.2 Algorithme de calcul des indices de confort PMV et PPD



II.5.3.3 Résultats

A partir des valeurs mesurées (tableaux 2-4 : 2-6), on obtient les valeurs suivantes des indices PMV et PPD pour chaque bureau et pour différentes valeurs de vitesse du vent

▪ **Pour $v = 0.02\text{m/s}$**

Tableau 2-4 : Indices PMV et PPD pour $v=0.02\text{m/s}$

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
PMV	0.64	-0.16	-0.06	2.26	1.32	0.60	-0.95	1.11	0.13	1.84	0.90
PPD%	13.65	5.58	5.08	87.15	41.59	12.71	24.10	31.23	5.36	69.60	22.34

La zone de confort étant définie pour $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ selon la norme ISO 7730, on constate que : les bureaux B2, B3 et B9 qui respectivement ont des valeurs de -0.16, -0.06 et 0.13 pour PMV pour une vitesse de vent égale à 0.02m/s sont confortables selon la norme ISO 7730. Le bureau B3 paraît ici plus confortable que les deux autres. Par conséquent les quadruplets (0.50clo, 50.017%, 23.50°C, 24.91°C), (0.87clo, 40%, 22°C, 22.62°C) et (0.76clo, 51%, 22.44°C, 24.83°C) donnent les conditions de confort respectivement pour les bureaux B2, B3 et B9. L'humidité relative ayant des valeurs inférieures à 60% au niveau de ces bureaux, son influence sur le confort est très faible. Le bureau B3 est plus confortable que les deux autres et cela s'explique par la faible valeur de l'écart entre la température ambiante et celle radiante dans ce bureau. Evidemment, cet écart vaut 0.62°C, 1.41°C et 2.39°C respectivement pour les bureaux B3, B2 et B9. Les autres bureaux inconfortables ont un taux d'humidité relative plus élevé, et parfois supérieure à 60%. L'humidité relative de 57.16% au bureau B1 moins élevée n'a pas d'influence sur le confort. L'inconfort de ce bureau est attribué à l'écart de température qui vaut ici 2,83 très peu différent de 3°C, source d'inconfort[31].

▪ **Pour $v = 0.65\text{m/s}$**

Tableau 2-5: Indices PMV et PPD pour $v = 0.65\text{m/s}$

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
PMV	-0.29	-1.14	-0.68	2.09	0.89	-0.16	-2.24	0.42	-0.60	1.56	0.21
PPD%	6.75	32.37	14.71	80.99	21.91	5.58	86.56	8.69	12.61	54.45	5.95

Les bureaux confortables pour la vitesse $v = 0.65\text{m/s}$ sont les bureaux B1, B6, B8 et B11 pour des valeurs de PMV respectives de -0.29, -0.16, 0.42 et 0.21. Les quadruplets suivants correspondent aux conditions de confort dans ces bureaux et sont respectivement (0.45 clo, 57.16%, 25.50°C, 28.33°C) ; (0.45 clo, 62.35%, 26.48°C, 26.55°C) ; (0.41 clo, 68.51%, 27.96°C, 28.19°C) et (0.45 clo, 67.57%, 27.35°C, 27.22°C). Le bureau B6 est plus confortable que le bureau B11, plus confortable que le bureau B1, plus confortable que le bureau B8. Ici les valeurs de l'humidité relative sont élevées et sont respectivement 62.35%, 67.57%, 57.16%, 68.51% pour les bureaux confortables B6, B11, B1 et B8. Les écarts de températures sont respectivement 0.07°C, 0.13°C, 2.83°C et 0.23°C pour les bureaux B6, B11, B1 et B8. Malgré que le bureau B1 ait alors le plus faible taux d'humidité et la plus faible valeur en température ambiante, il est moins confortable que les bureaux B6 et B11. L'écart de température trop élevée est une source d'inconfort pour le bureau B1, ce qui le pénalise par rapport au bureau B6 et B11, malgré ses faibles valeurs de température et de taux d'humidité. L'inconfort des autres bureaux est soit lié à la vitesse du vent trop élevée ou à l'action combinée de la température et de l'humidité relative élevée.

▪ **Pour $v = 1.2\text{m/s}$**

Tableau 2-6 : Indices PMV et PPD pour $v = 1.2\text{m/s}$

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
PMV	-0.66	-1.53	-0.89	2.04	0.75	-0.46	-2.82	0.15	-0.87	1.47	-0.04
PPD%	14.3	52.82	22.08	78.96	16.96	9.57	98.021	5.50	21.26	49.80	5.04

Les bureaux confortables sont les bureaux B6, B8, et B11 avec pour PMV les valeurs respectives suivantes 9.57, 5.50 et 5.50. Par conséquent les quadruplets correspondent aux conditions de confort pour une vitesse de 1.2m/s (0.45clo, 62.33%, 26.48°C, 26.55°C), (0.41 clo, 68.51%, 27.96°C, 28.19°C) et (0.41, 67.5, 27.35°C, 27.22°C). On constate ici que les bureaux confortables sont des bureaux où le taux d'humidité relative et la température sont plus élevés. L'inconfort dans ces bureaux a été annulé par l'action de la vitesse du vent.

II.5.3.4 Interprétations

La zone de confort étant définie pour $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ selon la norme ISO 7730, les figures suivantes permettent d'étudier l'influence de chacun des paramètres sur le confort thermique des bureaux testés.

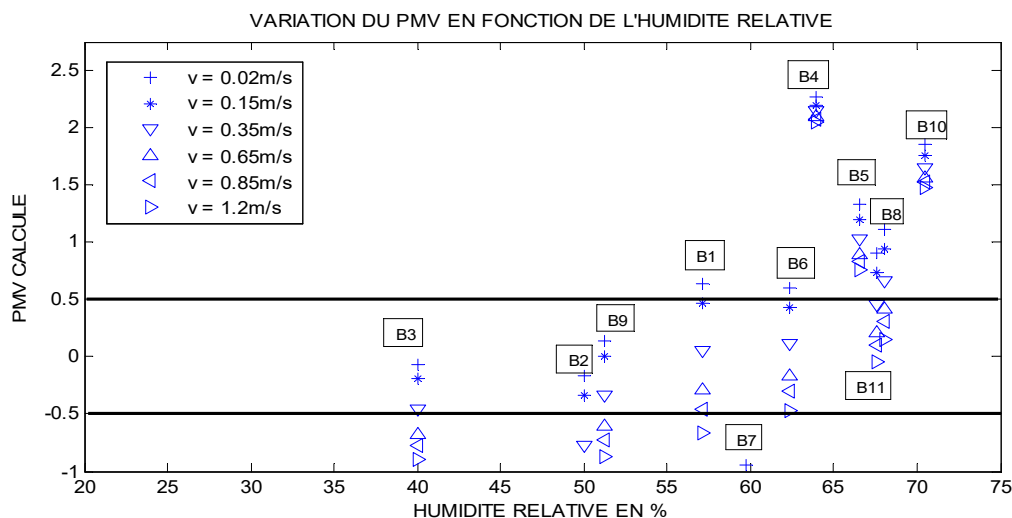


Figure 2-9 : Influence de l'humidité relative sur le PMV

La représentation du PMV en fonction de l'humidité relative (figure 2-9) nous présente ici les bureaux confortables pour différentes valeurs de vitesse. Ces bureaux sont ceux présents dans la zone de confort définie par la bande horizontale comprise entre -0.5 et 0.5. Par exemple le bureau B3 est confortable pour les vitesses 0.02m/s, 0.15m/s et 0.65m/s. Au-delà de 70%, l'humidité relative a une influence remarquable sur le confort des bureaux et représente une source d'inconfort. Ceci se remarque sur cette

courbe où les bureaux B10 et B4 malgré l'évolution en vitesse restent inconfortables. Comme on ne peut pas augmenter indéfiniment la vitesse, la limite de la vitesse du vent étant limitée 1.5m/s, toute vitesse supérieure à 1.5m/s pouvant provoquer des gênes (les feuilles s'envolent) [Y. Jannot et T. Djiako, 1994]

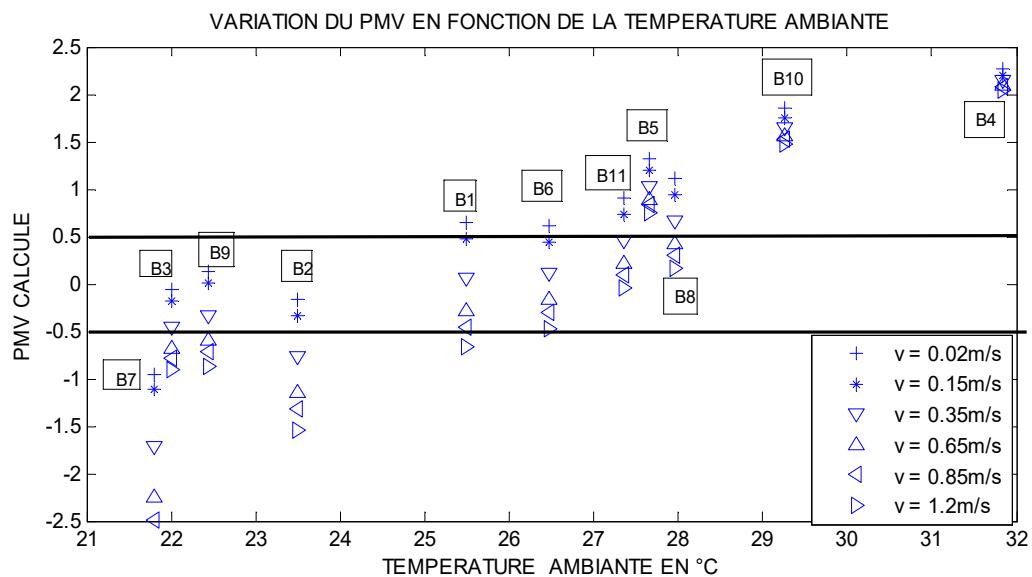


Figure 2-10 : Influence de la température ambiante sur le PMV

Sur la figure 2-10, il a été représenté l'évolution du confort en fonction de la température ambiante. Les bureaux confortables sont aussi présents dans la bande comprise entre -0.5 et 0.5. Comme le précédent, il permet d'apprécier l'influence de la température ambiante sur le confort des bureaux. On remarque ici qu'au-delà de 28°C, le confort n'est plus assuré.

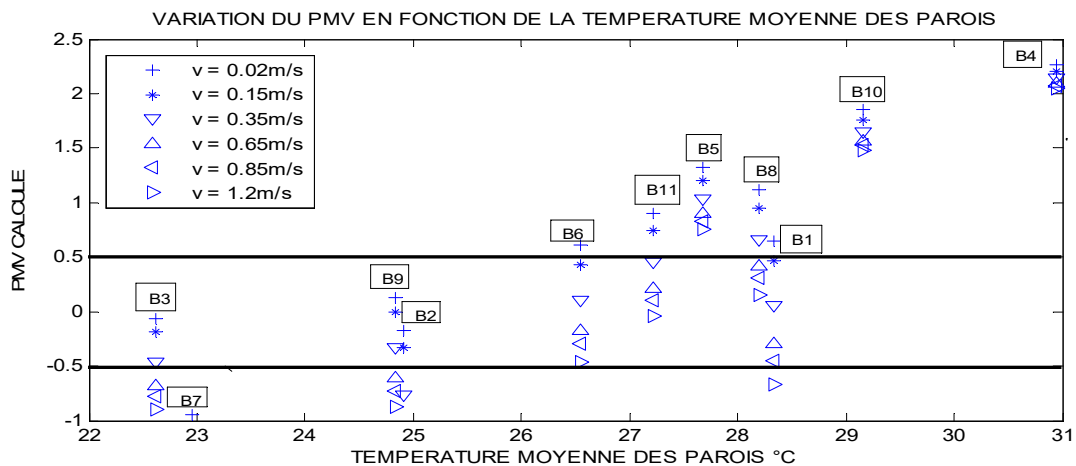


Figure 2-11: Influence de la température des parois sur le PMV

La figure 2-10 a les mêmes explications que la figure 2-11 puisque une différence importante entre la température radiante et celle ambiante pourrait être source d'inconfort.

En définitive, pour les mêmes vitesses, les bureaux se trouvant dans la zone de confort sont les mêmes aussi bien pour la figure 2-9 que pour les figures 2-10 et 2-11. Par conséquent les températures correspondantes sont les températures de confort pour différentes valeurs de la vitesse du vent.

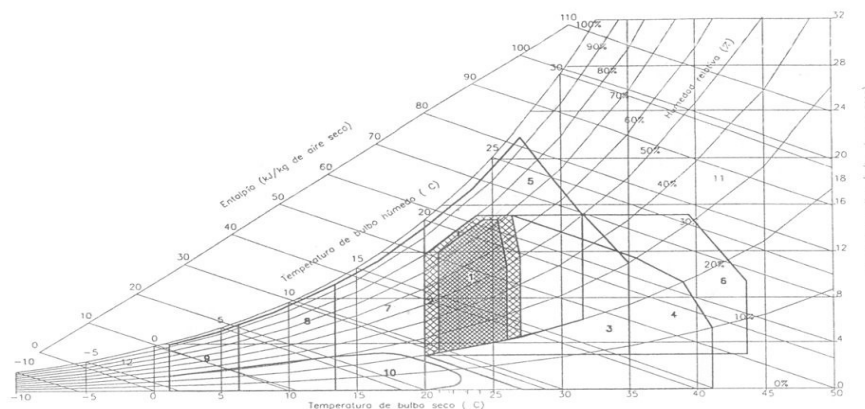


Figure 2-12 : Diagramme de Givoni

Dans le diagramme de Givoni, la zone de confort idéale s'étend en température de 20°C à 27°C. En région tropicale et humide, où la source d'inconfort est liée surtout à la mouillure cutanée, la température d'inconfort se manifeste dès que la température dépasse 28°C ou 29°C avec une vitesse de vent relativement **faible** [8]. Les bureaux confortables selon notre étude (modèle de Fanger) ont une température comprise entre 22°C et 27,96°C et le sont aussi selon le diagramme de Givoni puisque la plage [22°C, 27.96°C] est incluse [20°C, 28°C]. L'inconfort des bureaux 10, 4, 5 et 7 est lié soit à l'influence combinée du taux élevé d'humidité (60%-70%) et de la température ambiante trop élevée comprise entre 27°C et 32°C pour les bureaux (B5, B10 et B4) ou de la température basse pour le bureau B7.

Tableau 2-7 : Bureaux confortables selon FANGER

Vitesses du vent	Bureau confortable
0.02 m/s	B 3, B9, B2
0.15 m/s	B3, B9, B2, B6, B1
0.65 m/s	B6, B11, B8, B1
1.2 m/s	B6, B11

Tableau 2-8 : Température des bureaux confortables selon FANGER

Vitesses du vent	Températures de confort
0.02 m/s	22°C, 22.44°C, 23.5°C
0.15 m/s	22°C, 22.44°C, 23.5°C, 25.50°C, 26.48°C
0.65 m/s	26.48°C, 27.35°C, 27.96°C, 25.5°C
1.2 m/s	26.48°C, 27.35°C

II.5.3.5 Prise en compte de la sensation thermique des occupants des bâtiments : Traitement des données

a. Ambiances Climatisées

Les conclusions selon lesquelles les bureaux individuels 10, 4, 5 et 7 sont inconfortables nous paraissent quelque peu contraires au vécu quotidien des habitants de cette région malgré la vitesse limite de confort atteinte [32]. Dans cette région, l'humidité relative est souvent au-dessus des 70% et la température souvent supérieure à 28°C, cependant, les habitants arrivent à y vivre et éprouvent à certains moments des situations de confort. Ceci étant, les conclusions précédentes ne sont-elles pas hâtives du fait de la non prise en compte des sensations actuelles exprimées par les participants à notre enquête ? Le calcul de confort par utilisation du modèle PMV sans aucune modification ne serait-elle pas une transposition pure et simple des réalités des régions tempérées dans une région de climat chaud et humide ? Excluant les bureaux B10 et B4 où l'humidité et la température sortent du domaine d'applicabilité du modèle de FANGER [Fergus Nicol, 2004], il est bien possible que les sensations prédites par le modèle de FANGER dans les autres bureaux soient différentes de celles qu'auraient exprimées les occupants ! C'est d'ailleurs ce

qui a motivé la poursuite de nos investigations sur le confort thermique avec, pour objectif, la prise en compte des sensations exprimées par les occupants des bâtiments en reprenant de nouvelles enquêtes.

Pour prendre en compte la sensation thermique des occupants de bâtiments, nous avons utilisé les salles et laboratoires de travaux pratiques de l'école polytechnique d'Abomey Calavi. L'échelle ASHRAE en 7 points (figure 2-13) a été utilisée pour évaluer la sensation thermique des étudiants. Les figures (2-14 : 2-18) présentent les sensations thermiques en fonction de l'habillement de chacun des étudiants mesurées durant chacune des expériences réalisées en fonction des conditions hygrométriques et thermiques.

Les mesures dans ces ambiances ont été dépouillées et traitées. Le traitement des données sera illustré à partir des 5 premières expériences en ambiances climatisées. Les figures 2-14, 2-15, 2-16, 2-17 et 2-18 donnent les sensations thermiques des personnes ayant participé aux enquêtes à partir de l'échelle de la figure 2-13.

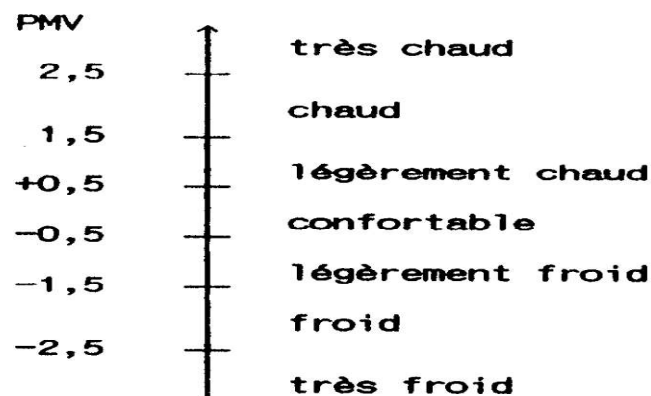


Figure 2-13 : Echelle de PMV

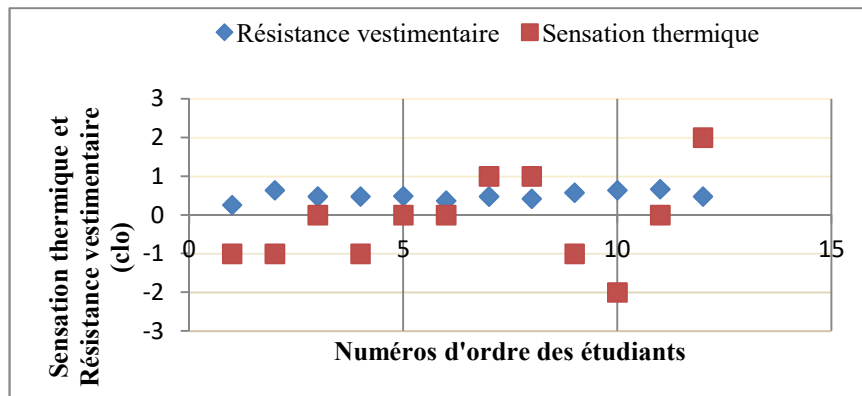


Figure 2-14 : Expérience 1 ($t_a=31.46^{\circ}\text{C}$; $\text{RH}=62\%$; $v=0.10\text{m/s}$ et $t_r=30^{\circ}\text{C}$)

Pour cette expérience, 1 personne a exprimé une sensation “chaud” (2), 2 personnes une sensation “légèrement chaud” (1), 4 personnes une sensation “confortable” (0), 4 personnes, une sensation ‘légèrement froid’ (-1) et 1 personne, une sensation “froid”

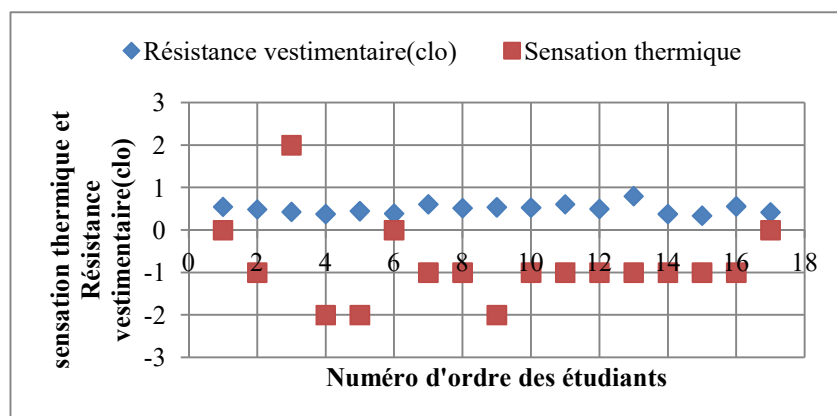


Figure 2-15 : Expérience 2 ($t_a=26.15^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=60.34\%$; $v=0.02\text{m/s}$ et $t_r=26.04^{\circ}\text{C}$)

Ici durant l’expérience 2 (figure 2-15), 1personne a exprimé une sensation “chaud” (2), 10personnes, une sensation “légèrement froid” (-1), 3personnes, une sensation ‘confortable’ (0) et 3 personnes, une sensation “froid” (-2).

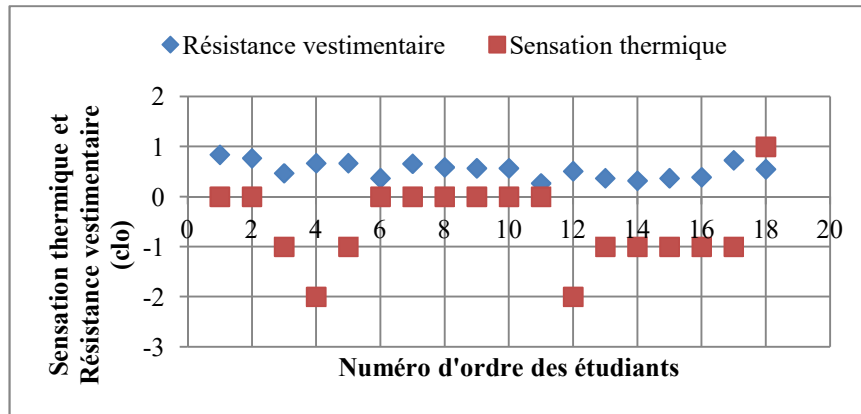


Figure 2-16 : Expérience 3 ($t_a=30.01$, $RH=60.38\%$ $v=0.09\text{m/s}$ et $t_r=30.01^\circ\text{C}$)

Dans l'expérience 3 (figure 2-16), 1 personne a exprimé la sensation "légèrement chaud"(1), 7 personnes ont exprimé la sensation "légèrement froid" (-1), 8 personnes, la sensation "confortable"(0) et 2 personnes, la sensation " froid " (-2).

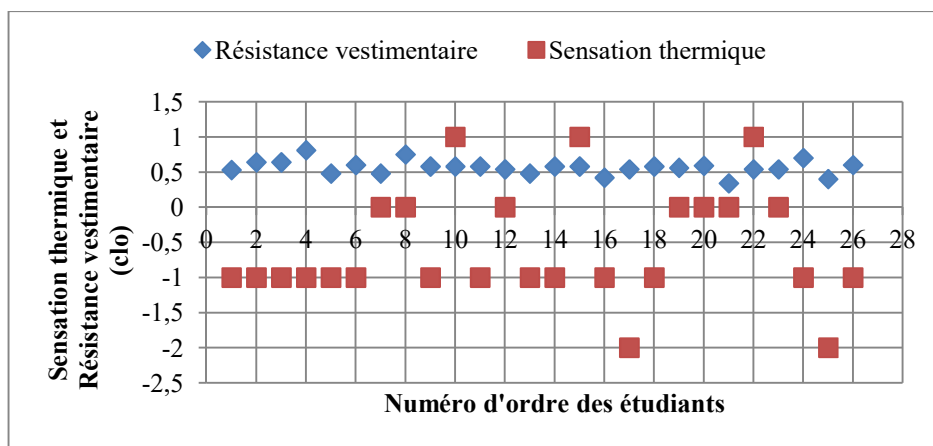


Figure 2-17 : Expérience 4 ($t_a=27.13^\circ\text{C}$; $RH=65.33\%$; $v= 0.03\text{m/s}$ et $t_r= 27^\circ\text{C}$)

Ici en expérience 4 (figure 2-17), 3 personnes ont exprimé une sensation "légèrement chaud"(1); 7 personnes, une sensation "confortable" (0); 14 personnes, une sensation "légèrement froid" (-1) et 2 personnes, une sensation "froid".

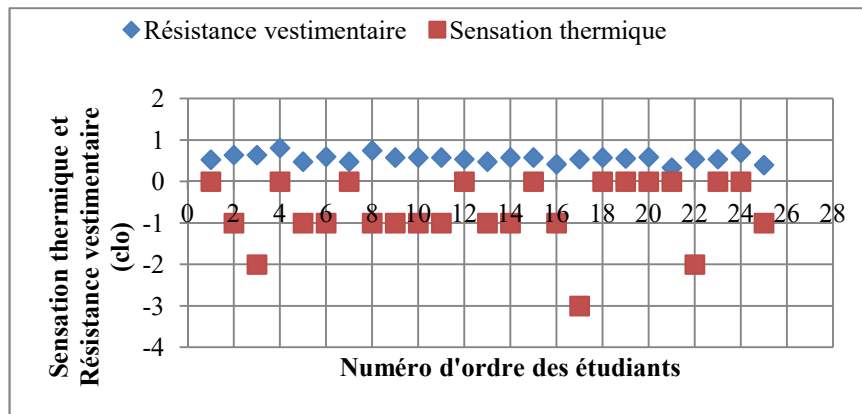


Figure 2-18 : Expérience 5 ($t_a=26.72^{\circ}\text{C}$; $\text{RH}=68.9\%$ $v=0.11\text{m/s}$ et $t_r=26.8^{\circ}\text{C}$)

En expérience 5 (figure 2-18), nous avons 11 personnes, qui ont exprimé une sensation de “confortable” (0), 11 personnes, une sensation “légèrement froid” (-1), 2 personnes “froid” (-2) et 1 personne à très froid (-3).

La dispersion de la distribution des votes de sensation thermique au niveau de chacune des expériences a été étudiée. Les observations dont la fréquence est très inférieure à la moyenne par rapport au nombre total de sensations observées durant l’expérience, ont été considérées comme aberrantes.

Exemple : L’expérience 1 nous a permis d’observer $p=5$ sensations thermiques différentes. La population ayant participé à l’enquête dans cette expérimentation étant de $N=12$ personnes, la fréquence moyenne f des observations par sensation est :

$f = \frac{12}{5} = 2.4$ Personnes, donc ici la sensation “chaud” est aberrante, car n’ayant enregistré qu’1 personne.

Le tableau 2 - 9 donne la répartition des étudiants selon les sensations recueillies au niveau de chaque expérience.

Tableau 2-9 : Répartition des étudiants selon les sensations recueillies

Expériences	Confortable	Légèrement froid	Froid	Très froid	Légèrement chaud	Chaud	Moyenne
Expérience 1	4	4	1	0	2	1	2.4
Expérience 2	3	10	3	0	0	1	4.25
Expérience 3	8	7	2	0	1	0	4,5
Expérience 4	7	14	2	0	3	0	6.5
Expérience 5	11	11	2	1	0	0	6.25

Le tableau 2-10 présente les numéros des étudiants dont les observations paraissent aberrantes par rapport à la moyenne.

Les observations aberrantes des différentes ambiances collectives sont retirées de chacune de nos expériences. On calcule le PMV moyen de chaque ambiance ou expérience. Le tableau 2-10 présente les résultats obtenus :

Tableau 2-10 : Présentation des observations aberrantes

Ambiances	t_a (°C)	RH(%)	Numéros des sensations aberrantes	Nature de l'ambiance
Expérience 1	31.46	62	10, 12	Climatisée
Expérience 2	26.15	60.34	3	Climatisée
Expérience 3	30.01	60.38	4, 12, 18	Climatisée
Expérience 4	27.13	65.33	10, 15, 17, 22, 25	Climatisée
Expérience 5	26.72	68.9	3, 17, 22	Climatisée

Les températures ambiantes allant jusqu'à 31.46°C (voir tableau 2-10), nous sommes ici en dehors du domaine d'applicabilité de FANGER en terme de la température ambiante.

b. Ambiances naturellement ventilées

Les observations aberrantes sont retirées de chacune de nos expériences. On calcule le PMV moyen de chaque ambiance ou expérience. La figure 2-19 présente les résultats obtenus :

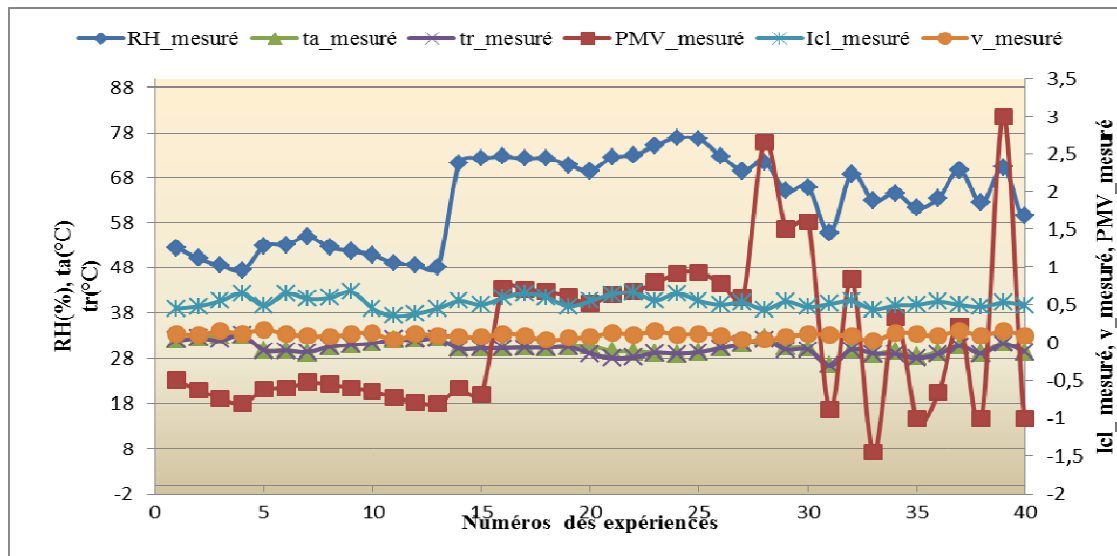


Figure2-19 : Paramètres mesurés en ambiances naturellement ventilées

De nos mesures (figure2-19), on remarque que les températures moyenne radiante et ambiante sont très peu différentes l'une de l'autre. Ceci confirme l'effet de l'ombrage et des stores. Les vitesses de vent mesurées sont très faibles ($0.01 \text{ m/s} < v < 0.17 \text{ m/s}$) et varient très peu. L'habillement aussi varie très peu. Cela va sans dire puisque les étudiants ont ici un uniforme vestimentaire pour assister au cours. Les températures sont presque constantes. Les seules caractéristiques sont l'humidité relative et le PMV. Les 30 premières observations montrent sur la figure 2-19, que le PMV et l'humidité relative varient de la même manière. Au-delà des 30 premières observations, on constate que le PMV et l'humidité relative ne sont plus parfaitement en phase. Ceci pourrait s'expliquer par le caractère subjectif que comporte le vote de sensation thermique des participants et pourrait être à l'origine d'une erreur d'appréciation de sensation thermique par certains participants.

II.5.3.6 Comparaison des PMV calculés et ceux mesurés sur le terrain

a. Ambiances climatisées

En utilisant le système d'équations 2-1, 2-2, 2-3 et 2- 4, on calcule les valeurs du PMV dans chacune des ambiances. Les résultats sont reportés dans le tableau 2-11

Tableau 2-11 : Paramètres mesurés et calculés en ambiances climatisées

Ambiances	t_a (°C)	RH(%)	I(clo)	PMV mesuré	PMV calculé	t_r (°C)	v(m/s)	ΔPMV
Ambiance 1	26.15	60.34	0.52	-1	0.56	26.04	0.02	1.56
Ambiance 2	31.46	62.00	0.48	-0.20	1.95	30	0.10	2.15
Ambiance 3	30.01	60.38	0.53	-0.46	1.74	30.01	0.09	2.20
Ambiance 4	27.13	65.33	0.57	-0.66	0.98	27	0.03	1.64
Ambiance 5	26.72	68.90	0.56	-0.50	0.82	26.8	0.11	1.32

Une représentation du PMV calculé (PMV_calculé) par FANGER en fonction du PMV mesuré dans les ambiances (PMV_mesuré), nous a donné la figure 2-20.

En observant les figures (2-20) et (2-21), on constate que les points représentant le PMV calculé selon FANGER sont placés au - dessus de la première bissectrice du plan qui matérialise les valeurs du PMV mesuré. On remarque aussi que le PMV calculé par le modèle de FANGER, est positif, tandis que le PMV mesuré est dans les ambiances climatisées ici négatif. Evidemment en ambiances climatisées, il est rare que les Africains aient des inconforts de chaleur. Soit l'ambiance est légèrement froide, ou confortable. C'est d'ailleurs ce qui se note à travers le tableau (2-11). En revanche en ambiances naturellement ventilées, le PMV mesuré peut être positifs ou négatif mais inférieur au PMV calculé par le modèle de FANGER. Par conséquent, il existe un biais entre les PMV calculés et ceux mesurés sur le terrain, c'est-à-dire les sensations thermiques actuelles. Ce biais que nous notons ΔPMV a été calculée (voir tableau 2-11)

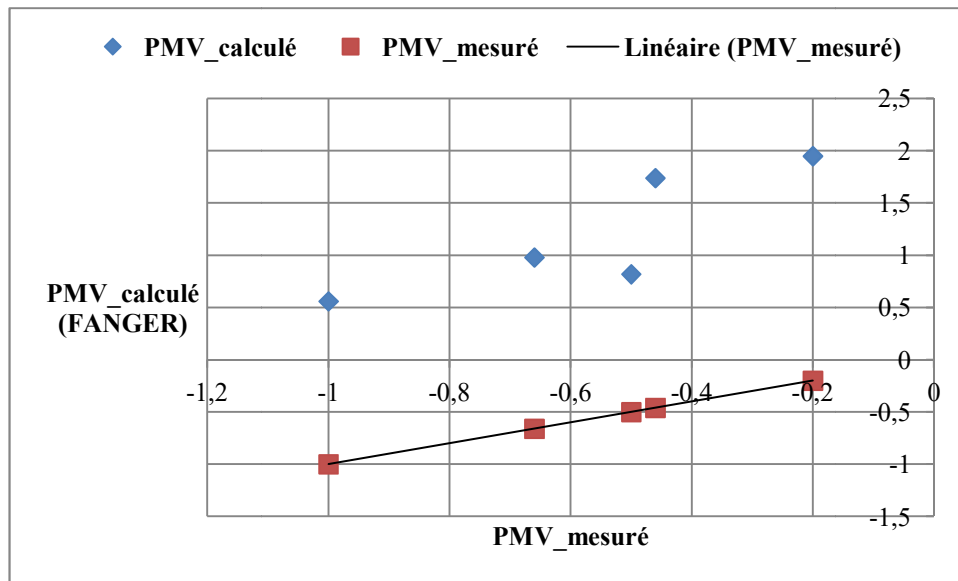


Figure 2-20 : Comparaison PMV mesurés en ambiances climatisées (sensation thermique actuelles) et PMV calculés (prédits)

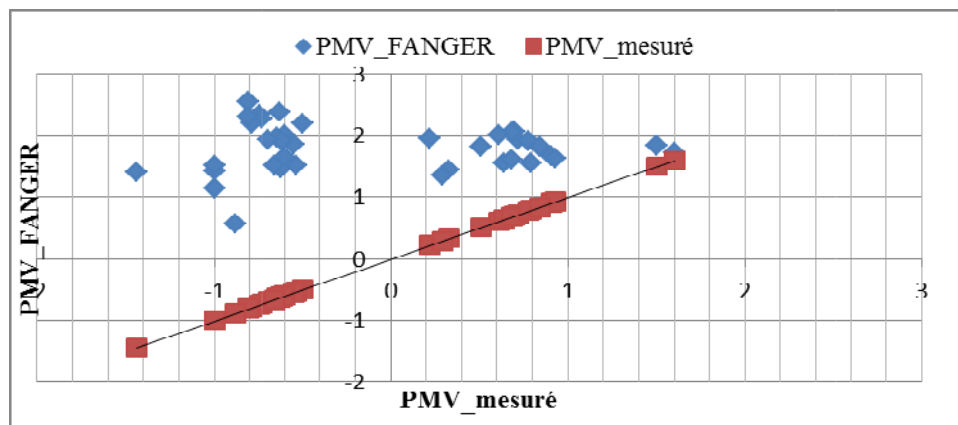


Figure 2-21 : Comparaison PMV mesurés en ambiances naturellement ventilées (sensation thermique actuelles) et PMV calculés (prédits)

II.5.4 Adaptation du modèle de FANGER à la bande côtière du Bénin

Les valeurs plus élevées du PMV calculé par rapport au PMV mesuré par le modèle de FANGER, nous laissent penser à l'adaptation du modèle de FANGER aux conditions climatiques du Bénin, par un coefficient correctif. Par conséquent dans les conditions climatiques de la bande côtière du Bénin, on pourra écrire que :

$$PMV_{new} = (0.303 \exp(-0.036.M) + 0.028) [M - 3.0510^{-3} (5733 - 6.99M - p_a) - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5} M (5867 - p_a) - 0.0014M (34 - t_a) - 3.96.10^{-8} f_{cl} ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] - \Delta PMV \quad (2.6)$$

PMV_{new} désignant le PMV de FANGER adapté à la région du Sud côtier du Bénin en ambiance climatisée.

Il faut constater que ce facteur correctif n'est pas constant ; mais varie avec le PMV mesuré, autrement dit avec la température et l'humidité relative.

II.5.4.1 Modèle du facteur correctif adaptant le modèle de FANGER à la bande côtière du Bénin

a. Ambiances climatisées

Pour la déterminer, nous ferons une régression multilinéaire. Le tableau 2-12 présente les spécifications de la régression.

Tableau 2-12 : Synthèse de la régression

R=0.99 ; R2=0.99 ; F(2,4)=798.24 ; p<0.00008				
	B	Ecart –type	t(3)	P
ta(°C)	0.13	0.0151	8.9750	0.0029
RH	-0.032	0.006	-4.8250	0.016966

Le facteur correctif est donné alors par la relation suivante :

$$\Delta PMV = PMV_{calculé} - PMV_{mesuré} \quad (2-7)$$

$$\Delta PMV = 0.13ta - 0.032RH \quad (2-8)$$

L'expression du PMV adapté à la bande côtière du Bénin, soit le PMV_{new} sera définie :

$$PMV_{new} = (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028) [M - 3.0510^{-3} (5733 - 6.99M - p_a) - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5} M (5867 - p_a) - 0.0014M (34 - t_a) - 3.9610^{-8} f_{cl} ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] - (0.13ta - 0.0326RH) \quad (2-9)$$

Tableau 2-13: Comparaison entre PMV_{new} et $PMV_{mesuré}$

Ambiances	$PMV_{mesuré}$	$PMV_{calculé}$	ΔPMV	PMV_{new}	$\varepsilon_{rel} \%$
Ambiance 1	-1	0.56	1.56	-0.89	1.8
Ambiance 2	-0.20	1.95	2.15	-0.15	0.8
Ambiance 3	-0.46	1.74	2.20	-0.22	4
Ambiance 4	-0.66	0.98	1.64	-0.45	3.5
Ambiance 5	-0.50	0.82	1.32	-0.44	1

$$\varepsilon_{rel} (\%) = \frac{|PMV_{new} - PMV_{mesuré}|}{6} \quad (2-10)$$

Nous avons testé le modèle obtenu en comparant le $PMV_{mesuré}$ dans 7 autres ambiances climatisées. Les résultats sont consignés dans les tableaux 2-13 et 2-14 et montrent une erreur relative inférieure ou égale à 6%.

Tableau 2-14: Multiplication des expériences

Ambiances	t_a (°C)	RH(%)	I(clo)	t_r (°C)	Vm/s	$PMV_{mesuré}$	PMV_{new}	$\varepsilon\%$
Ambiance 1	26.15	60.34	0.52	26.04	0.02	-1	-0.89	1.8
Ambiance 2	31.46	62.00	0.48	30	0.10	-0.20	-0.15	0.8
Ambiance 3	30.01	60.38	0.53	30.01	0.09	-0.46	-0.22	4
Ambiance 4	27.13	65.33	0.57	27	0.03	-0.66	-0.45	3.5
Ambiance 5	26.72	68.90	0.56	26.8	0.11	-0.50	-0.44	1
Ambiance 6	29.9	64.7	0.52	29.9	0.01	0	-0.012	0.2
Ambiance 7	28.1	61.2	0.50	28.1	0.11	-0.66	-0.58	1.2
Ambiance 8	28.4	59	0.50	28.4	0.10	-0.46	-0.60	2.3
Ambiance9	30.01	60.38	0.53	30.01	0.15	-0.68	-0.29	6
Ambiance10	27.13	65.33	0.57	27.13	0.15	-0.69	-0.58	1.2
Ambiance11	26.72	68.9	0.56	26.72	0.15	-0.50	-0.53	0.5
Ambiance12	30.3	64.7	0.52	30.3	0.01	0	0.04	0.8

En ambiances 2 et 3 (tableaux 2-13 et 2-14), on a observé des situations de confort caractérisées par des PMV_mesuré de -0.2 et de -0.46. Les paramètres hygrothermiques de ces ambiances avec les mêmes résistances vestimentaires, prédisent avec le modèle de FANGER des situations d'inconfort de chaleur. Par conséquent, ceci confirme le résultat selon lequel les personnes des zones chaudes et humides acceptent des températures élevées plus que celles des zones tempérées. Cette acceptation de températures élevées, relèverait- t – elle d'une question d'habitude ou d'une constitution physiologique des habitants de cette région ?

Dès lors, on peut déterminer la zone de confort en ambiance climatisée. Plusieurs simulations ayant été faites sous "matlab", les résultats suivants ont été obtenus pour différentes valeurs de températures comprises entre 22°C et 31°C. A 22 °C et pour un habillement de 0.85 clo et une vitesse de l'air ambiant très faible c'est-à-dire 0.02m/s, le confort n'est obtenu que lorsque l'humidité prend des valeurs entre 74% et 98% qui n'ont pas été mesurées durant nos campagnes de mesure en ambiance climatisée. Si la vitesse de l'air était plus élevée que 0.02m/s, il serait impossible d'avoir un confort dans les limites d'humidités relatives mesurées en ambiance climatisée dans la bande côtière du Bénin à cette température.

Tableau 2-15 : conditions de confort en ambiance climatisée (Portes et fenêtres bien fermées)

	ta (°C)	23°C	24°C	25°C	26°C	27°C	28°C
RH (%)	Min	70	68	66	62	58	56
	Max	70	70	70	70	70	70

Si l'on doit considérer la remarque selon laquelle les températures de 29.25°C et 31.83°C sont obtenues du fait de l'ouverture de la porte et d'une fenêtre du bureau et considérant le fait qu' à 22°C, quel que soit l'habillement admis en climat tropical et humide, une sensation de froid sera beaucoup plus ressentie par les occupants des ambiances, on pourra restreindre les températures

admises en ambiance climatisée à l'intervalle compris entre 23°C et 28°C. Ainsi, la zone de confort serait celle comprise entre 23°C et 28°C en température et entre 58% et 70% en humidité relative (voir tableau 2-15). Dans ce cas, on se retrouverait dans les conditions de confort en ambiance climatisée en climat tropical et humide de la Côte d'Ivoire [33].

En restant dans les limites de nos mesures sur le terrain, le confort thermique en ambiance climatisée est obtenu pour les conditions suivantes :

Tableau 2-16: conditions de confort en ambiance climatisée (influence du climat extérieur)

v(m/s)	RH(%)	ta (°C)								
		23°C	24°C	25°C	26°C	27°C	28°C	29°C	30°C	31°C
0.02	min (%)	70	68	66	62	58	58	56	52	48
	max (%)	70	70	70	70	70	70	70	70	70

Cependant, nous allons représenter la zone de confort (voir figure 2-22) en tenant compte des spécificités du Bénin). On remarque que la zone de confort définie est incluse dans celle définie par GIVONI [34].

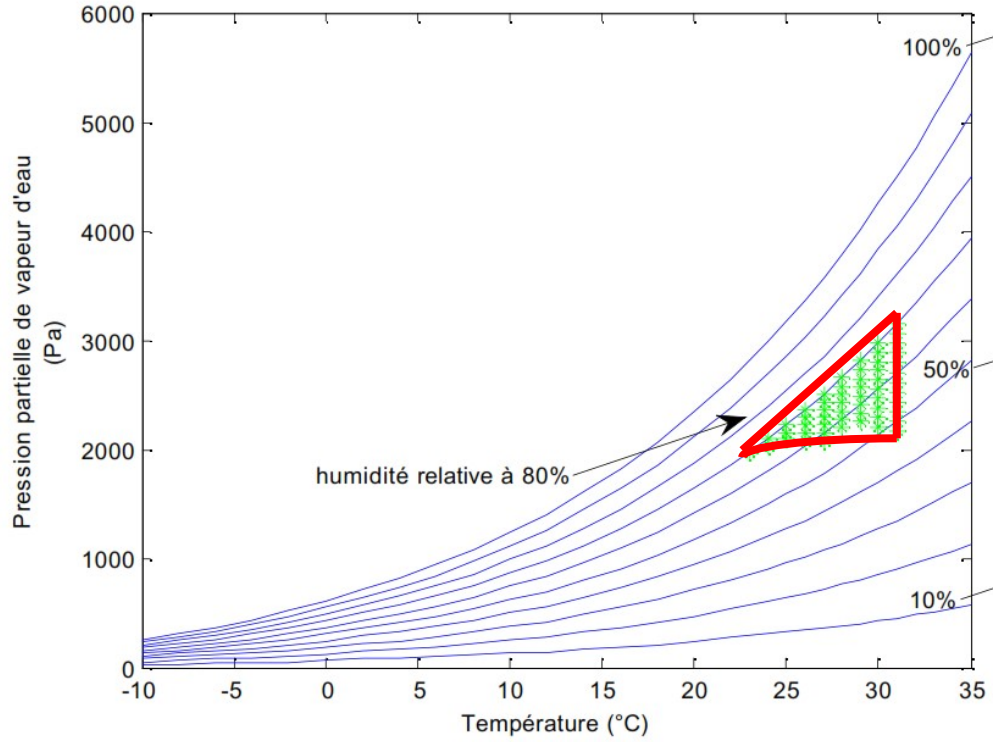


Figure 2-22 : Zone de confort en ambiances climatisées

b. Ambiances naturellement ventilées

Comme dans le cas des ambiances climatisées, on remarque ici aussi que le PMV calculé selon FANGER est supérieur à celui mesuré sur le terrain. Cette supériorité, nous laisse penser à l'adaptation du modèle de FANGER aux conditions climatiques du Bénin, par un coefficient correctif comme c'est le cas en ambiances climatisées. Par conséquent, dans les conditions climatiques de la région côtière du Bénin et en ambiances naturellement ventilées, on pourra écrire que :

$$\begin{aligned}
 PMV_{new} = & (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028)[M - 3.0510^{-3}(5733 - 6.99M - p_a) \\
 & - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5}M(5867 - p_a) \\
 & - 0.0014M(34 - t_a) - 3.9610^{-8}f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - \Delta PMV
 \end{aligned}
 \tag{2-11}$$

L'expression du facteur correctif est obtenu comme précédemment à partir d'une régression multilinéaire. Le tableau 2-17 présente les spécifications de la régression.

Tableau 2-17 : Régression pour modèle validé

	Synthèse de la Régression			
	R=0,95; R ² =0,90			
	F(2,48)=228,27 p<0,00006 Err-type:0,59283			
N=39	b	Err-Type de b	t(48)	valeur de p
ta (°C)	0,15	0,015	10,16	0
RH (%)	0,046	0,007	-6,55	0

$$\Delta PMV = 0.15ta - 0.046RH \quad (2-12)$$

Par conséquent, on pourra écrire que :

$$\begin{aligned} PMV_{new} = & (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028)[M - 3.0510^{-3}(5733 - 6.99M - p_a) \\ & - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5}M(5867 - p_a) \\ & - 0.0014M(34 - t_a) - 3.9610^{-8}f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - (0.15t_a - 0.046RH) \end{aligned} \quad (2-13)$$

II.5.4.2 Application au comportement thermique d'un immeuble entièrement vitré à Cotonou

a. Méthodologie

Le modèle adapté ayant été validé, nous l'avons testé pour étudier le comportement thermique d'un immeuble entièrement vitré à Cotonou (figure 3).

Le verre utilisé pour ce bâtiment est du simple vitrage ayant 4mm d'épaisseur et de caractéristiques thermiques les valeurs suivantes :

- Le coefficient de déperdition de chaleur $U = 5.68 \text{ W. m}^{-2}\text{K}^{-1}$,
- Le facteur solaire $g = 0.855$.

Le sol, est composé d'un carrelage, d'un mortier et d'une dalle. Le plafond est quant à lui composé de plâtre, d'une lame d'air, du béton lourd et du carrelage, Les murs internes sont composés de plâtre d'une épaisseur de 0.015m, de briques pleines de 0,09m d'épaisseur et de granite de 0.015m d'épaisseur. La

vitesse de l'air ambiant est supposée nulle, L'habillement des personnes à l'intérieur du bâtiment est de 0.6clo. L'infiltration est de 0.6/h. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel TRNSYS. Les données météorologiques utilisées sont celles de Lagos au Nigéria, ville située à moins de 100km de Cotonou et jouissant du même climat que celle de la bande côtière du Bénin. Ces données ont été utilisées en raison de l'indisponibilité des données directes du Bénin



Figure 2-23 : Bâtiment test

Dans la bande côtière du Bénin, la température du jour et de la nuit ne variant quasi pas [GRET, juillet 2009], il est important d'étudier l'influence de l'humidité relative par rapport au confort thermique dans cette région. C'est l'objectif de l'application de ce modèle à l'étude thermique d'un bâtiment test

b. Simulation thermique du bâtiment

En utilisant les données de météoforme, on obtient le résultat de la figure (2-24). Le confort thermique est défini pour 4 paramètres physiques à savoir la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air ambiant et de la température moyenne radiante et pour deux paramètres physiologiques que sont le métabolisme et l'habillement. Dans le cas de la simulation thermique du bâtiment, la vitesse de l'air ambiant est prise comme nulle, l'habillement

0.6clo et le métabolisme 1.2met. Les seuls paramètres variant sont la température de l'air ambiant, la température moyenne radiante et l'humidité relative (figure 2-24).

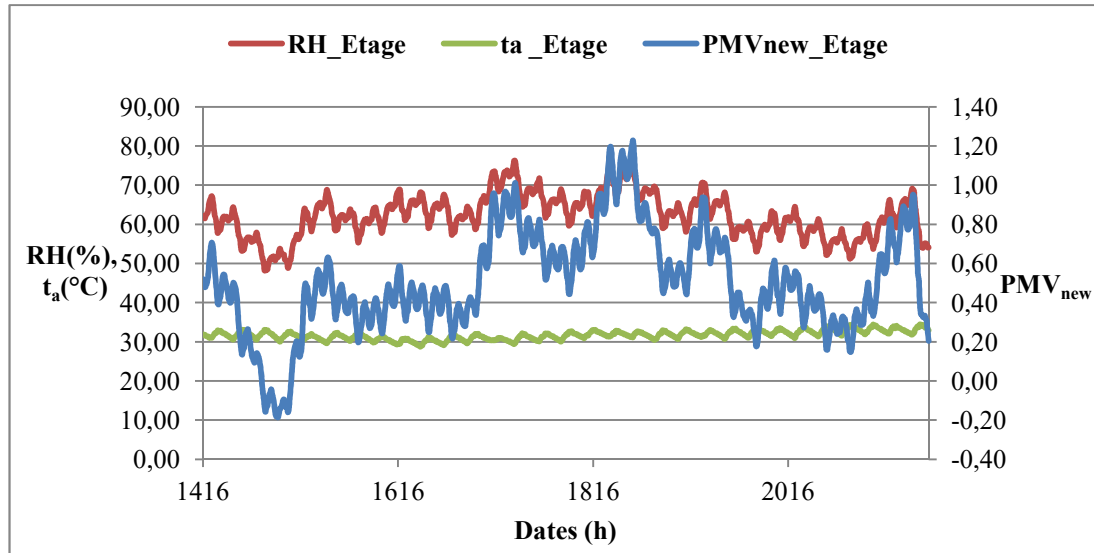


Figure 2-24 : Comportement thermique du bâtiment

La température de l'air ambiant ne variant pas, caractéristique des climats chauds et humides en Afrique, les gains solaires étant atténués ici par le système d'ombrage et les stores, la température moyenne des parois et celle de l'air ambiant sont quasi les mêmes. Par conséquent, il en vient que le PMV varie uniquement en fonction de l'humidité relative. Une régression linéaire du PMV adapté à la bande côtière du Bénin par rapport à l'humidité relative donne un coefficient de régression $R^2 = 0.81$ avec une pente positive de 0.043 (figure2-25). Ceci permet de dire que le PMV adapté à la bande côtière du Bénin (PMV_{new}), et l'humidité relative varient dans le même sens.

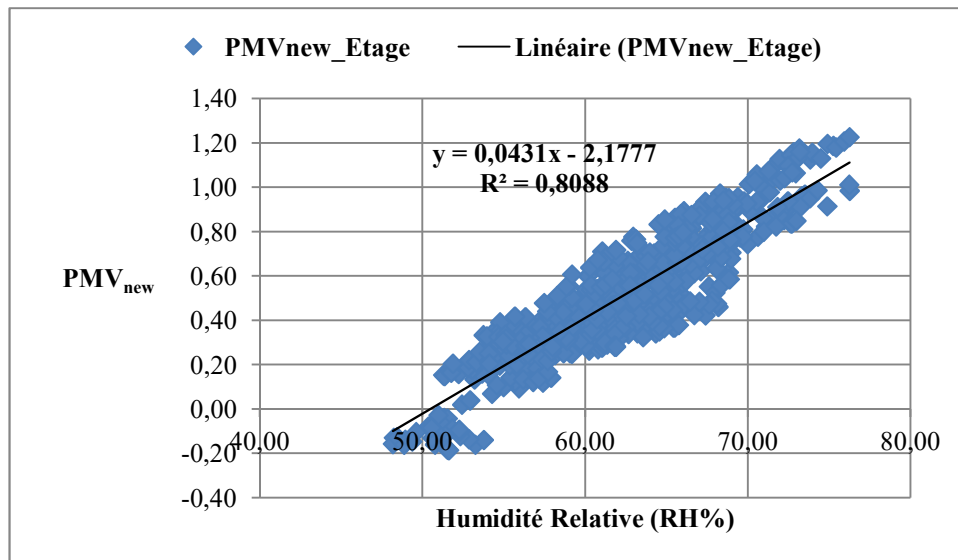


Figure 2-25: Régression linéaire du PMV_{new} en fonction de l'humidité relative

$$PMV_{new} = 0.043RH - 2.178 \text{ avec } R^2 = 0.81 \quad (2-14)$$

Toutefois, en comparant la pente de la droite d'équation (2.14) au coefficient de l'humidité relative dans l'équation (2.13), on constate une erreur relative d'environ 6.5%, ce qui indique que le terme linéaire de la relation (2.13) est prépondérant en ce qui concerne l'influence de l'humidité relative sur le niveau de confort dans la bande côtière du Bénin. La corrélation est de plus positive (l'augmentation de l'humidité relative tend à augmenter le PMV). En revanche, l'augmentation de la température tend à diminuer le confort (via le terme $-0.15t_a$). On pourra en conclure alors que contrairement aux pays tempérés où la température a un effet plus important par rapport à l'humidité sur le confort thermique, dans la bande côtière du Bénin, l'humidité relative paraît plus prépondérante par rapport à la température. Cette dernière, ne variant pas dans le temps, l'humidité relative devient alors le facteur discriminant dont dépend le PMV c'est-à-dire le confort thermique dans la bande côtière du Bénin

c. Ventilation

En considérant les limites de vitesse d'air ambiant admises en climat chaud, on obtient la zone de confort définie dans le tableau 2-18. On constate à travers ce

tableau que les limites du taux d'humidité admises pour garantir le confort décroissent avec la température pour une même vitesse de l'air ambiant. Plus la température est élevée, plus basses seront les limites admises des taux d'humidité relative pour permettre à l'air ambiant de faire évaporer les pertes d'eau libérées par les glandes sudoripares. Par contre, pour une même température, les limites d'humidité relative croissent avec la vitesse de l'air ambiant, c'est-à-dire que des valeurs plus élevées d'humidité relative garantiraient le confort thermique par la capacité de l'air à faire évaporer la sueur.

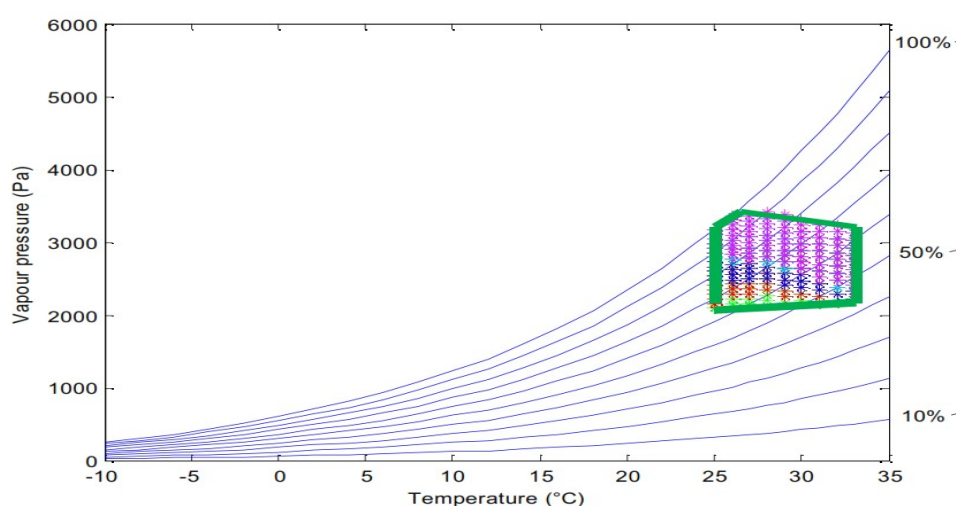


Figure 2-26 : Zone de confort (ambiances naturellement ventilées)

Tableau 2-18 : Zone de confort en fonction de la vitesse de l'air ambiant

		t_a (°C)								
v (m/s)	RH(%)	25°C	26°C	27°C	28°C	29°C	30°C	31°C	32°C	33°C
0.02	min (%)	66	64	60	58	54	52	48	46	44
	max (%)	84	80	78	74	70	68	64	62	60
0.2	min (%)	68	68	64	62	56	54	50	48	44
	max (%)	90	86	82	78	72	70	68	64	60
0.4	min (%)	78	74	70	66	60	56	52	48	44
	max (%)	94	90	86	82	78	74	68	64	60
1.2	min (%)	88	82	78	72	66	62	56	50	46
	max (%)	100	100	94	88	82	78	72	66	62
1.5	min (%)	90	84	78	74	68	62	56	52	46
	max (%)	100	100	94	90	84	78	72	68	62

II.5.4.3 Interprétations physiologiques

Evidemment l'Européen et l'Africain n'ont pas les mêmes sensations thermiques. Les températures et humidités des ambiances considérées dans nos travaux, étant plus élevées que celles admises en climat tempéré, il semble que la sensation thermique est plus sévère (en température élevée) chez les personnes des climats tempérés que chez l'Africain. Cette sévérité ou supériorité de sensation s'exprime par ce biais ΔPMV des équations (2-6 et 2-11).

Si l'on considère que les sensibilités du PMV par rapport à la température, respectivement à l'humidité relative, correspondent à la sensation par rapport à la température respectivement à l'humidité relative de l'individu, on pourra écrire les relations suivantes :

$$PMV_{new} = PMV - \Delta PMV \quad (2-15)$$

Les sensibilités seront ici exprimées par les dérivées partielles de l'équation (2-15) respectivement par rapport à la température et l'humidité relative. On pourra écrire alors :

- **Pour les ambiances climatisées**

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial ta} = \frac{\partial PMV}{\partial ta} - 0.13 \quad (2-16)$$

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial RH} = \frac{\partial PMV}{\partial RH} + 0.032 \quad (2-17)$$

- **Pour les ambiances naturellement ventilées**

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial ta} = \frac{\partial PMV}{\partial ta} - 0.15 \quad (2-16')$$

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial RH} = \frac{\partial PMV}{\partial RH} + 0.046 \quad (2-17')$$

Aux regards des relations (2-16), (2-16') et (2-17), (2-17') on peut dire ce qui suit :

En considérant comme référence, la sensation thermique des personnes du climat tempéré, l'introduction de ΔPMV dans l'équation de FANGER (équation de sensation thermique des personnes du climat tempéré), nous permet de constater que l'adaptation de celle-ci à la région du sud côtier du Bénin, **augmenterait la sensation à l'humidité relative de 3.2%** en ambiance climatisée, **respectivement 4.6%** en ambiance naturellement ventilée, chez les Africains par rapport à celle des personnes des climats tempérés. En revanche, **la sensation à la température diminuerait de 13%** en ambiance climatisée **respectivement de 15%** en ambiance naturellement ventilée, par rapport à celle des Européens, ce qui exprime que les Africains de la bande côtière du Bénin, seraient moins sensibles à la température que les personnes du climat tempéré, donc accepteraient ici des températures élevées. La sensation de fraîcheur ou de chaleur chez l'Africain du Sud côtier du Bénin, ne s'expliquerait-elle pas par la capacité de l'air ambiant à pouvoir évaporer les pertes d'eau transépidermique insensible et de la sueur chez l'Africain, pertes d'eau qui seraient aussi fonction de la température et plus abondante chez l'Africain que chez l'Européen [35] [36] ? Si oui, on dira alors que, plus la température serait élevée, plus abondante serait cette perte d'eau. De cette façon, moins l'air ambiant serait chargé en eau, plus il refroidirait la peau en évaporant facilement cette perte d'eau. N'est – ce pas ce que l'on constate quand on compare les ambiances 1 et 2 (tableau 2-13) qui ont à peu près les mêmes humidités relatives, mais des températures très différentes l'une de l'autre (température en ambiance 2 supérieure à celle en ambiance 1) ? Si oui, c'est que les occupants de l'ambiance 2 ont une perte d'eau plus abondante que ceux de l'ambiance 1. Par conséquent, les occupants de l'ambiance 1 vont

ressentir plus de fraîcheur que ceux de l'ambiance 2. De la même manière, les occupants de l'ambiance 3 auront plus froid que ceux de l'ambiance 2, tandis que ceux de l'ambiance 5 auront moins froid que ceux de l'ambiance 4. Ceci étant, le confort thermique des bâtiments dans la bande côtière du Bénin ne serait – il pas ici dépendant plus de l'humidité que de la température ? Si oui, on dira que chez l'Africain de la bande côtière du Bénin, la température ne participe pas directement à la sensation de la chaleur, mais fait accroître la perte transépidermique insensible d'eau et de sueur dont l'évaporation va dépendre des caractéristiques hygrométriques de l'air ambiant. Par conséquent, chez l'Africain de la bande côtière du Bénin, la température pourra être considérée comme étant un paramètre de "**sensation latente**" tandis que l'humidité relative de l'air ambiant, un paramètre de "**sensation sensible**" par analogie aux notions d'énergie latente et énergie sensible.

La diminution de la sensation à la température chez l'homme noir de la bande côtière du Bénin ne pourrait – elle pas être expliquée par un pouvoir réfléchissant de sa peau des infrarouges plus élevé chez les Africains de la bande côtière du Bénin que chez les Européens? Si oui, quelle serait cette substance qui confère à la peau noire de cette population, cette nuance ethnique par rapport à la peau blanche? Evidemment, les rayonnements infrarouges qui atteignent la peau sont partiellement réfléchis et partiellement absorbés. L'ampleur de cette réflexion pourrait dépendre de la pigmentation, de l'irrigation sanguine de la peau et de sa structure mécanique. Cet effet protecteur dont bénéficierait la peau des personnes de la bande côtière du Bénin, ne proviendrait – il pas de la mélanine comme c'est le cas avec les ultra - violets du soleil malgré quelques controverses ici et là sur cette hypothèse [37] ?

Toutes ces questions méritent d'être approfondies car très peu d'études ont été entreprises sur les propriétés mécaniques de la peau des personnes habitant la bande côtière du Bénin.

Les équations (2-16) et (2-16') sont de la même forme. Elles diffèrent l'une de l'autre par les valeurs des constantes qui ici expriment le degré de sensation selon que l'on soit en ambiance climatisée ou en ambiance ventilée. Evidemment, en ambiance naturellement ventilée, les paramètres température et humidité relative sont souvent plus élevés que ceux en ambiance climatisée. Par conséquent la sensation chez les personnes des climats tempérés sera plus vive en ambiance naturellement ventilée et s'exprimerait par le coefficient (-0.15) qu'en ambiance climatisée et s'exprimerait par le coefficient (-0.13). Autrement dit, à cause de ces constantes, on dira que l'Africain de la bande côtière du Bénin est plus sensible à la température basse, donc accepte moins les températures basses que les températures élevées.

De même, les différences entre les équations (2-17) et (2-17') se situent au niveau des constantes. L'humidité étant plus élevée en ambiance naturellement ventilée qu'en climatisée, la sensation à l'humidité relative sera plus intense chez l'homme de la bande côtière du Bénin en ambiance naturellement ventilée et s'exprime par le coefficient (+0.046) qu'en ambiance climatisée par rapport aux personnes des climats tempérés et s'exprime par le coefficient (+0.032)

II.5.4.4. Facteur d'espérance des béninois de la bande côtière du Bénin :

Calcul du PMV étendu de FANGER à la bande côtière du Bénin

La supériorité du PMV de FANGER à la sensation thermique en climat chaud s'explique par le fait que les personnes vivant dans ce type de climat soient habituées à la chaleur et par conséquent leurs attentes sont différentes de celles vivant dans un climat tempéré. Selon FANGER et TOFTUM [38], cette attente est matérialisée par un facteur e compris entre 0.5 et 1 et doit multiplier le PMV en climat tempéré. Il vaut 1 pour les ambiances conditionnées ou

climatisées. Quant aux bâtiments naturellement ventilés, ce facteur dépend de la durée de la période de chaleur le long de l'année et du nombre de bâtiments climatisés dans la région. Si le nombre de bâtiments climatisés dans une région donnée est très peu et qu'il fait chaud presque toute l'année ce facteur e vaut 0.5 et 0.7 si le nombre de bâtiments climatisés dans la région est élevé. Pour les bâtiments non climatisés d'une région où il ne fait que chaud l'été avec absence ou peu de bâtiments climatisés, le facteur d'espérance est compris entre 0.7 et 0.8 et entre 0.8 et 0.9 pour des régions avec un nombre de bâtiments climatisés élevé. Dans les régions où la période de chaleur est très courte durant l'été, ce facteur est compris entre 0.9 et 1.

Dans la bande côtière du Bénin, il fait chaud tout le long de l'année, avec une période très courte de fraîcheur aux mois d'Août et de Janvier. Par conséquent, la bande côtière du Bénin serait classée parmi les régions à faible espérance en matière de confort thermique. Nous avons déterminé la valeur maximale de température pour laquelle, on est à la limite du confort thermique c'est-à-dire la valeur pour laquelle le PMV adapté à la bande côtière du Bénin vaut 0.5, comme l'exige l'algorithme.

En considérant le PMV adapté à la bande côtière du Bénin comme étant le PMV étendu au climat chaud de FANGER, on va réduire le métabolisme de $1.41 \times 6.7\%$, soit de 9.44% et on recalcule le PMV de FANGER qui devient le $PMV_{réduit}$.

En effet, en prenant pour température ambiante $t_a = 30^\circ\text{C}$ et une vitesse maximale de 1.5m/s , un métabolisme de 70W/m^2 et $I_{cl}=0.55\text{clo}$, on a le tableau suivant.

Tableau 2-19 : Calcul du facteur d'espérance pour $t_a=30^\circ\text{C}$

RH (%)	69.39	72.39	75.39	77.65	81,39	82	83	90.39	93.39	94.39	97.39
PMV	1.35	1.38	1.41	1.43	1.46	1.47	1.48	1.55	1.58	1.58	1.61
PMV_{new}	0.04	0.21	0.37	0.5	0.71	0.74	0.8	1.2	1.37	1.43	1.59
$PMV_{réduit}$	1.22	1.25	1.29	1.31	1.35	1.35	1.36	1.44	1.47	1.48	1.51

Par conséquent, le facteur d'espérance sera $0.5/1.31 = 0.38$ qui est inférieur à 0.5. On en déduit que 30°C ne pourra pas être la valeur de la température maximale pour laquelle on est à la limite de confort.

On refait le même calcul pour la température ambiante $t_a = 29.20^{\circ}\text{C}$ et une vitesse maximale de 1.5m/s , un métabolisme de 70W/m^2 et $I_{cl}=0.55\text{clo}$, on a le tableau suivant

Tableau 2-20 : Calcul du facteur d'espérance pour $t_a=29.20^{\circ}\text{C}$

RH(%)	77.65	81.39	81.42	81.90	82	83	84
PMV	1.07	1.11	1.11	1.1	1.11	1.12	1.13
PMV_{new}	0.27	0.47	0.47	0.5	0.51	0.56	0.62
$PMV_{réduit}$	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99	1.007	1.01

Par conséquent, comme précédemment, on obtient $e = \frac{0.50}{0.99} = 0.50$ qui est admise selon FANGER et TOFTUM.

On peut alors écrire : $PMV_e = PMV_{new} = 0.5PMV_{réduit}$. (2-18)

La relation (2-18) ci-dessus montre qu'après réduction du PMV de FANGER, il faudrait le multiplier par le facteur de 0.5 pour avoir la sensation thermique dans la bande côtière du Bénin. Ce facteur ne prend pas en compte les sensations de fraîcheur ressenties par les habitants de cette région durant le mois de Janvier où l'air extérieur devient plus sec que d'habitude. Evidemment pour une humidité relative basse entre 45% et 62%, et une température comprise entre 24°C et 28°C , les habitants de la bande côtière du Bénin ont une sensation de fraîcheur (figure 2-27), tandis que le $PMV_{réduit}$ de Fanger prédit une sensation de chaleur confortable ou inconfortable qui est une valeur positive qui n'exprime pas une sensation de fraîcheur !

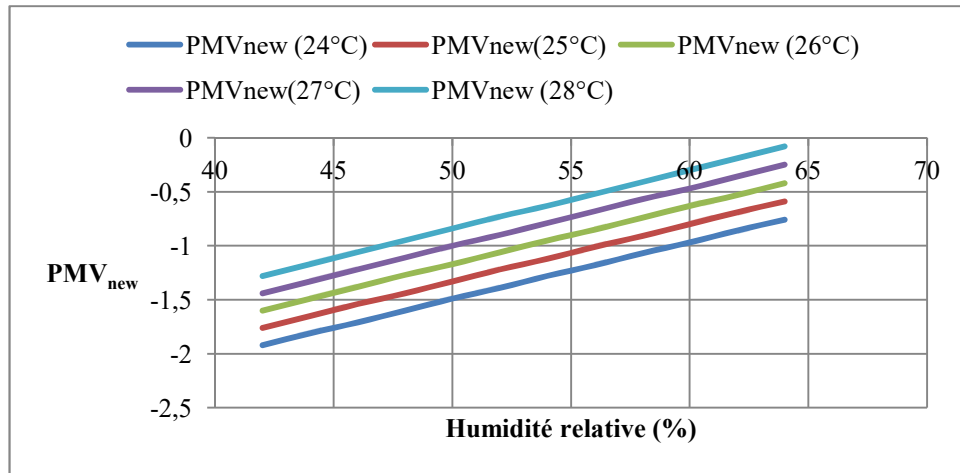


Figure 2-27 : Sensation thermique des béninois de la bande côtière du Bénin pour des températures et humidités de l'air relativement basses

Mieux, la régression linéaire de la sensation thermique mesurée sur le terrain en fonction du $PMV_{réduit}$ (figure 2-28), donne la relation suivante :

$$PMV_{mesuré} = 0.499PMV_{réduit} - 0.823 \quad R^2 = 0.046 \quad (2-19)$$

Il est facile de constater que l'ordonnée à l'origine de l'équation ci-dessus (2-19) n'est pas négligeable. Le coefficient R^2 de corrélation est aussi très faible. Par conséquent, il est impossible de recommander dans cette région l'utilisation du modèle étendu de FANGER avec pour espérance 0.5 pour apprécier le confort thermique des bâtiments dans cette région. Cette remarque a été mise en exergue avec les travaux d'An Tuan Nguyen [39] au Vietnam et ceux de Wagner Augusto Andreasi [40] à Corumba et à Campo Grande au Brésil. Est – ce ici une erreur de choix de l'espérance des béninois en matière de confort thermique des bâtiments ?

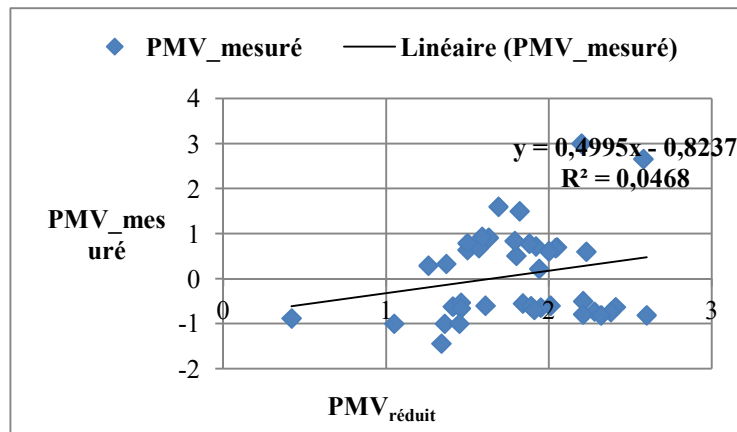


Figure 2-28 : Vote de sensation thermique ou le PMV_mesuré en fonction du PMV_réduit

II.6 Définition de la zone de confort

II.6.1 Méthodologie

La norme NBN EN 15251, la norme ISO 7730 et le standard ASHRAE 55 (1992), évaluant que l'intervalle de température acceptable en été et dans le climat tempéré est comprise entre les valeurs de 23°C et 26°C, nous avons calculé les PMV définis par le modèle de FANGER et celui adapté à la bande côtière du Bénin en faisant varier l'humidité relative entre 30% et 94% ; la température moyenne radiante étant prise égale à la température ambiante, la résistance vestimentaire 0.5clo, le métabolisme une valeur de 1.2 met soit 70W/m². Le confort étant obtenu pour un pourcentage d'insatisfaits PPD inférieur ou égal à 10%, la zone de confort correspond à la zone où le PMV est compris entre -0.5 et 0.5.

Après avoir retiré des valeurs de PMV calculés, celles comprises entre -0.5 et 0.5 pour chacune des températures respectives de 23°C, 24°C, 25°C et 26°C en fonction de l'humidité relative allant de 30% à 94%, nous avons placé chacun des points (t_a, RH) correspondant dans le diagramme psychrométrique (t_a, RH). Le confort idéal est obtenu pour des valeurs de PMV qui sont très proches de 0

Tableau 2-21 : Présentation des différentes valeurs de PMV pour différents
valeurs de température

RH(%)	PMV_23	PMVnew_23	PMV_24	PMV_new_24	PMV_25	PMVnew_25	PMV_26	PMVnew_26
30	-0.61	-2.68	-0.31	-2.53	-0.02	-2.39	0.26	-2.25
32	-0.6	-2.58	-0.3	-2.42	-0.001	-2.27	0.28	-2.14
34	-0.59	-2.47	-0.28	-2.32	0.01	-2.17	0.29	-2.03
36	-0.57	-2.37	-0.27	-2.21	0.02	-2.06	0.31	-1.92
38	-0.56	-2.26	-0.26	-2.11	0.04	-1.96	0.32	-1.82
40	-0.55	-2.16	-0.24	-2	0.05	-1.85	0.34	-1.71
42	-0.54	-2.06	-0.23	-1.9	0.06	-1.74	0.35	-1.6
44	-0.53	-1.95	-0.22	-1.79	0.08	-1.64	0.37	-1.5
46	-0.52	-1.85	-0.2	-1.69	0.09	-1.53	0.38	-1.39
48	-0.5	-1.74	-0.19	-1.58	0.11	-1.43	0.4	-1.28
50	-0.49	-1.64	-0.18	-1.48	0.12	-1.32	0.41	-1.18
52	-0.47	-1.53	-0.16	-1.37	0.13	-1.21	0.43	-1.07
54	-0.46	-1.43	-0.15	-1.27	0.15	-1.11	0.44	-0.96
56	-0.45	-1.32	-0.14	-1.16	0.16	-1	0.46	-0.86
58	-0.44	-1.22	-0.12	-1.05	0.18	-0.9	0.47	-0.75
60	-0.43	-1.12	-0.11	-0.95	0.19	-0.79	0.49	-0.64
62	-0.41	-1.01	-0.1	-0.84	0.2	-0.68	0.5	-0.53
64	-0.4	-0.91	-0.08	-0.74	0.22	-0.58	0.52	-0.43
66	-0.39	-0.8	-0.07	-0.63	0.23	-0.47	0.53	-0.32
68	-0.38	-0.7	-0.06	-0.53	0.25	-0.37	0.55	-0.21
70	-0.36	-0.59	-0.04	-0.42	0.26	-0.26	0.56	-0.11
72	-0.35	-0.49	-0.03	-0.32	0.27	-0.15	0.58	-0.004
74	-0.34	-0.38	-0.02	-0.21	0.29	-0.05	0.59	0.1
76	-0.33	-0.28	-0.008	-0.11	0.3	0.05	0.61	0.2
78	-0.31	-0.17	0.004	-0.007	0.32	0.15	0.62	0.31
80	-0.3	-0.07	0.01	0.09	0.33	0.26	0.64	0.42
82	-0.29	-0.02	0.03	0.2	0.34	0.37	0.65	0.52
84	-0.28	0.13	0.04	0.3	0.36	0.47	0.67	0.63
86	-0.26	0.23	0.05	0.41	0.37	0.58	0.68	0.74
88	-0.25	0.34	0.07	0.51	0.39	0.68	0.7	0.85
90	-0.24	0.44	0.08	0.62	0.4	0.79	0.71	0.95
92	-0.23	0.55	0.09	0.72	0.42	0.9	0.73	1.06
94	-0.21	0.65	0.11	0.83	0.43	1	0.74	1.17

II.6.2 Résultats

Nous avons obtenu la représentation de la figure 2-29. Les zones de confort sont ici représentées par des ellipses. L'ellipse délimitant la zone de confort dans la bande côtière du Bénin est circonscrite dans la zone de confort de

FANGER en climat tempéré. Le tableau 2-21 présente les différentes plages d'humidité pour lesquelles, il est possible d'avoir des ambiances confortables communes aux deux zones. Les limites d'applicabilité du modèle de FANGER, nous imposent la restriction de nos études à une plage d'humidité relative n'excédant pas 70%. Cependant l'humidité dans la bande côtière du Bénin peut aller au-delà. Ce qui voudrait dire que pour des températures comprises entre 24°C et 25°C, on pourrait avoir des ambiances de confort communes au climat tempéré et à la bande côtière du Bénin, région à climat chaud et humide. On en déduit alors que la zone de confort commune aux deux régions serait celle délimitée par les valeurs des températures comprises entre 24°C et 25°C et d'humidités relatives, éléments de l'intervalle [66%; 70%].

En faisant varier la température entre 24.10°C et 25°C et l'humidité relative entre 66% et 68%, on constate que le confort est atteint dans la bande côtière du Bénin et pour les mêmes hypothèses de calcul, pour les couples (t_a , RH) suivants : (24.90°C, 66%) ; (25°C, 66%) ; (t_a °C, 68%) $24.20^\circ C \leq t_a \leq 25^\circ C$. Pour ces couples de valeurs, l'Européen aura un confort de chaleur tandis que le Béninois, un confort de fraîcheur (voir figure 2-30). Evidemment, les personnes des zones chaudes et humides demandent des températures élevées que celles des zones tempérées.

Tableau 2-22 : Plages d'humidité relative confortable communes au climat tempéré et à celui de la bande côtière du Bénin

Température (°C)	Humidité Relative (%)	Observation
23	72-90	Non applicable pour humidité trop élevée
24	70-86	Idem
25	66-70	Applicable
26	Néant	

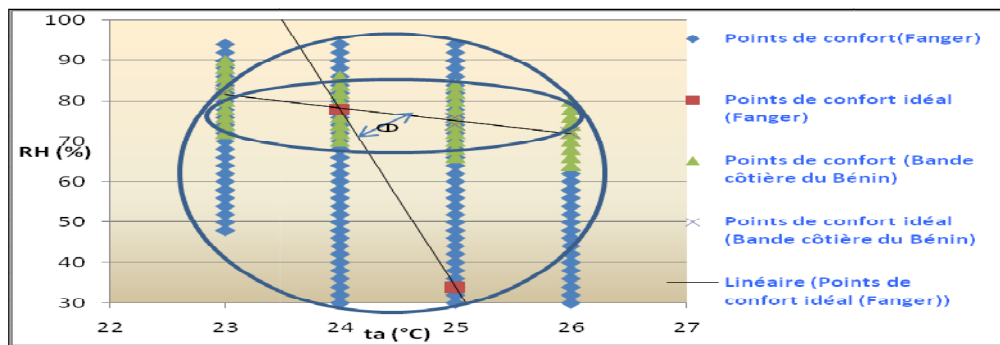


Figure 2-29: Représentation des zones de confort de FANGER et de celle de la bande côtière du Bénin pour de faibles températures

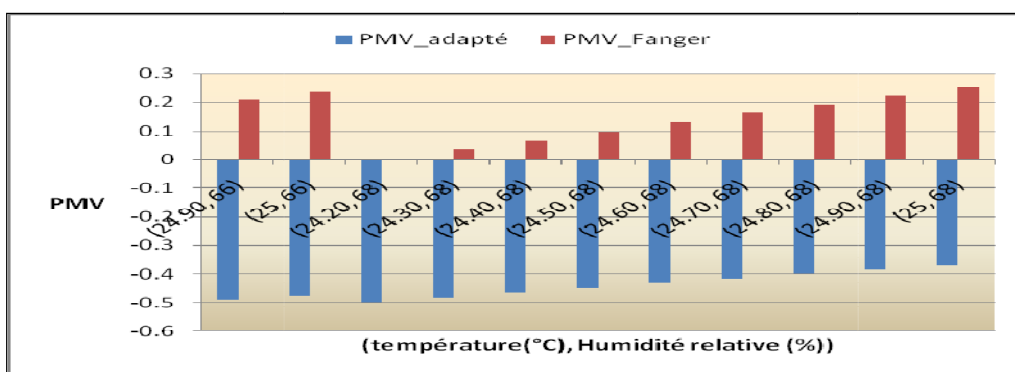


Figure 2-30 : Couples (Température, Humidité relative) confortables aussi bien en climat tempéré que dans la bande côtière du Bénin

Les températures dans la bande côtière du Bénin pouvant prendre des valeurs supérieures à 30°C, nous avons élargi notre plage de température pour représenter la zone de confort (voir figure 2-31).

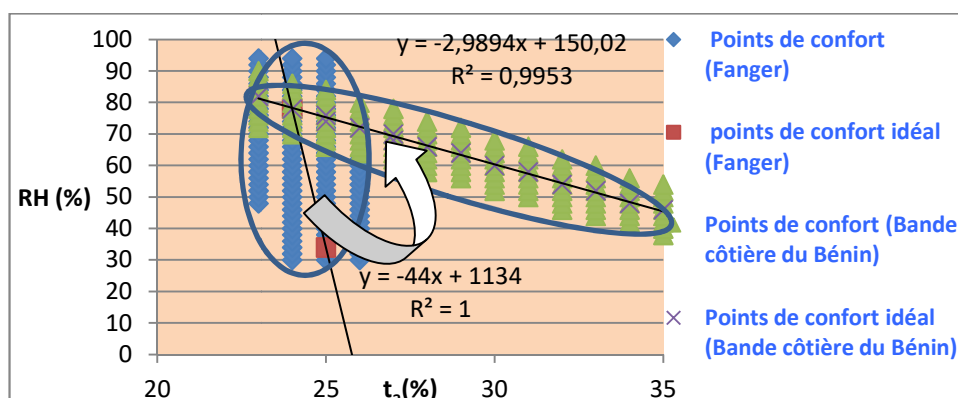


Figure 2-31: Position de la zone de confort de la bande côtière du Bénin pour des températures élevées par rapport à celle de FANGER (Ellipse)

La figure 2-31 montre que l'ellipse définissant la zone de confort de la bande côtière du Bénin est plus allongée que celle de la zone tempérée et que les différents lieux de confort idéal forment entre eux un angle θ qui explique la prépondérance de l'humidité relative par rapport à la température dans cette région. Les points définissant le confort idéal sont parfaitement alignés. Par conséquent, on suppose qu'entre les lieux de confort idéal des différents climats susmentionnés, il existerait une isométrie affine et plus précisément une rotation affine r de centre Ω (t_a , RH) et d'angle θ qui pourrait permettre de passer du lieu de confort idéal de FANGER en climat tempéré au lieu de confort idéal dans la bande côtière du Bénin.

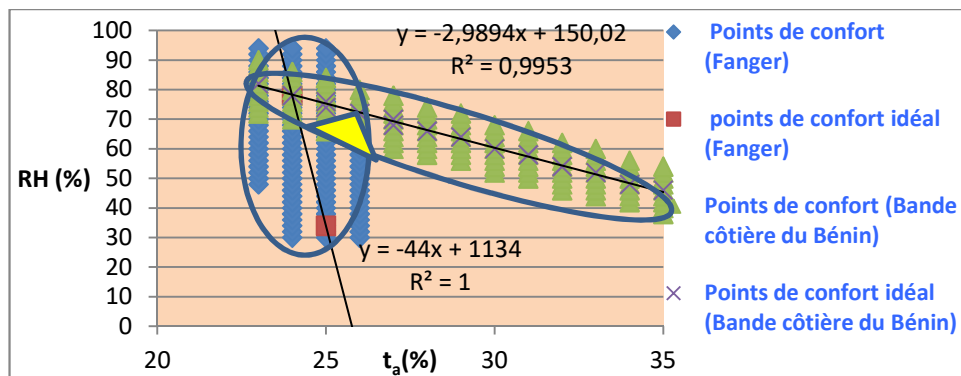


Figure 2-32 : Zone de confort commun au climat tempéré et celui de la bande côtière du Bénin

II.7 Mise en perspective de l'approche adaptative par rapport à celle de FANGER

II.7.1 Application de l'approche adaptative pour évaluer le confort thermique des bâtiments dans la bande côtière du Bénin

La méthodologie du modèle adaptatif est basée sur des mesures in situ et établit à partir des questionnaires et des mesures de température, de la vitesse d'air ambiant et de l'humidité relative, une corrélation linéaire entre la température de confort ou la température idéale de confort à l'intérieur d'un immeuble en fonction de la température de l'extérieur.

A partir des enquêtes, HUMPHREYS (1978) a déterminé la corrélation entre la moyenne mensuelle des températures extérieures et la température de confort à l'intérieur d'un immeuble, qu'il soit naturellement ventilé ou climatisé.

Selon Humphreys pour les ambiances naturellement ventilées, la température de confort est donnée par la relation suivante:

$$T_c = 0.53T_o + 11.9 \quad \text{avec } R = 0.97 \quad (2-20)$$

Où $T_c(^{\circ}\text{C})$ est la température de confort et $T_o(^{\circ}\text{C})$ la température extérieure moyenne

GRIFFITHS a établi aussi des modèles de température de confort à partir de la moyenne mensuelle des températures extérieures. Il obtint différents modèles à partir de différentes constantes appelées constantes de "GRIFFITHS".

Tableau 2-23: Différents modèles de confort adaptatifs en fonction des différentes valeurs de la constante de "GRIFFITHS et résultat R^2) de la régression sur les données expérimentales

Constance de Griffiths	Equation de confort adaptatif	R^2	Constance de Griffiths	Equation de confort adaptatif	R^2
0.2	$T_c = 0.017T_o + 26.20$	0.00006	1.2	$T_c = 0.581T_o + 13.36$	0.49
0.33	$T_c = 0.284T_o + 20.14$	0.0443	1.4	$T_c = 0.604T_o + 12.85$	0.531
0.4	$T_c = 0.355T_o + 18.5$	0.095	1.5	$T_c = 0.607T_o + 12.85$	0.534
0.5	$T_c = 0.423T_o + 16.96$	0.18	1.6	$T_c = 0.609T_o + 12.72$	0.538
0.6	$T_c = 0.468T_o + 15.93$	0.262	1.7	$T_c = 0.614T_o + 12.61$	0.543
0.7	$T_c = 0.500T_o + 15.20$	0.331	2.0	$T_c = 0.626T_o + 12.33$	0.554
0.8	$T_c = 0.525T_o + 14.65$	0.385	3.0	$T_c = 0.649T_o + 11.82$	0.566
0.9	$T_c = 0.543T_o + 14.22$	0.426	5.0	$T_c = 0.667T_o + 11.41$	0.569
1.0	$T_c = 0.559T_o + 13.88$	0.457			

Parmi nos mesures faites dans des ambiances naturellement ventilées très peu de mesures nous permettent d'établir une régression linéaire significative qui détermine la température de confort en fonction de la température moyenne

mensuelle extérieure. Pour cela, nous avons préféré utiliser une méthodologie qui consiste à tester certains de ces modèles sur les points de confort dont nous disposons.

Les modèles paramétrés respectivement par les constantes de GRIFFITHS 0.33 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 et 5 ont été testés.

Tableau 2-24: Calcul de la température de confort adaptatif selon le modèle de GRIFFITH de coefficient 0.6

N°	RH_mes	PMV_mes	ta_mes	tr_mes	Icl_mes	v_mes	T_conf	t _{out}
1	68.7	0.84	30	29.9	0.55	0.09	29.54	29.1
2	69.6	0.22	30.7	30.7	0.5	0.15	28.75	27.4
3	80.4	0.29	28.6	28	0.43	0.06	28.51	26.9
4	79.4	-0.6	27.4	27.4	0.59	0.28	28.51	26.9
5	79.5	1.6	29.7	29.9	0.48	0.12	28.51	26.9
6	71.4	2	31	31.5	0.5	0.11	28.94	27.8
7	80.4	0.43	30.2	29.5	0.51	0.24	28.94	27.8
8	70.9	1.14	31.4	31.6	0.47	0.1	28.94	27.8
9	71.9	0.72	31.3	31.2	0.5	0.09	28.94	27.8
10	72.1	0.54	31.2	31	0.54	0.09	28.94	27.8
11	60.34	-1	26.15	26.15	0.52	0.15	29.92	29.9
12	82.9	0.96	27.47	27.47	0.56	0.15	29.31	28.6

Les températures et humidité moyennes extérieures mesurées sont comprises

:

$$23^{\circ}\text{C} \leq t_{out} \leq 33^{\circ}\text{C}$$

$$75\% \leq RH_{out} \leq 85\%$$

La figure 2-33 présente les valeurs de la température de confort adaptatif en fonction des différents modèles retenus par rapport aux températures observées en ambiances 2, 3 et 7 qui ici sont les trois ambiances de confort. Les valeurs de température mesurée dans ces ambiances étant respectivement

30.7°C, 28.6°C et 30.2°C, les modèles de GRIFFITHS de constantes 0.6 et 5 donnent des valeurs de température plus proches de celles mesurées en ambiance que les autres modèles testés.

En définitive, des modèles de confort testés, ceux de GRIFFITHS de coefficient 5 et 0.6 semblent être les plus adaptés à la bande côtière du Bénin. Cependant, l'humidité relative étant le facteur discriminant de la sensation thermique des personnes de cette région, le modèle plus adapté serait celui qui mettrait en évidence l'influence de l'humidité relative

Tableau 2-25 : Température de confort en fonction des modèles testés

Température moyenne extérieure mensuelle	To=27.4°C	To=26.9°C	To=27.8°C
HUMPHREY	26.42°C	26.15°C	26.63°C
G=0.33	27.92°C	27.77°C	28.03°C
G=0.4	28.22°C	28.04°C	28.36°C
G=0.5	28.55°C	28.33°C	28.71°C
G=0.6	28.75°C	28.51°C	28.94°C
G=5	29.68°C	29.35°C	29.95°C

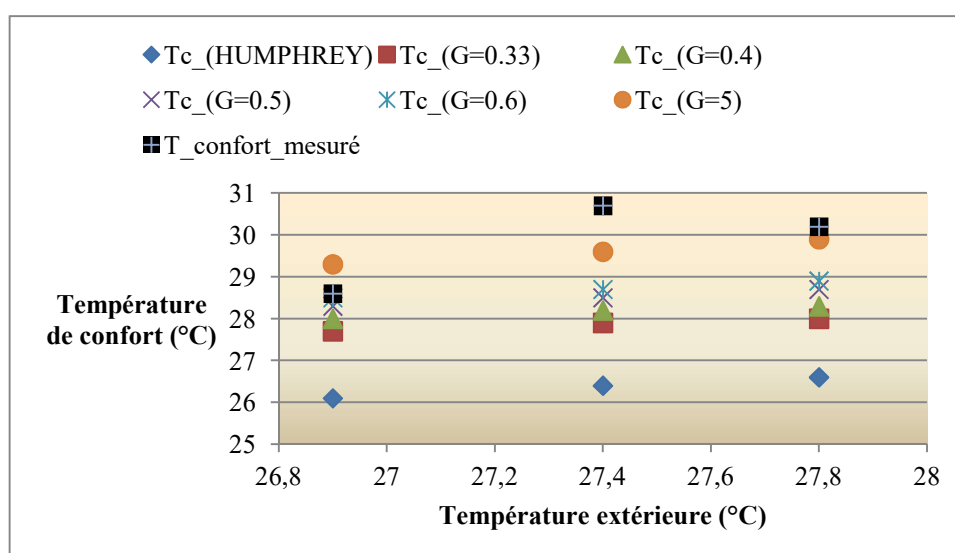


Figure 2-33 : Position des températures de confort en fonction des différents modèles retenus par rapport aux températures de confort mesurées

Pour cela, en posant:

$\Delta T = t_{a_mesuré} - T_c$ (la différence entre la température de confort adaptatif et celle mesurée) , nous avons fait une régression multilinéaire du $PMV_{mesuré}$ en fonction de ΔT (delta_T) et de l'humidité relative RH. De cette façon, pour chaque modèle de GRIFFITH's testé, nous avons pu écrire l'équation sous la forme suivante:

$$PMV_{mesuré} = a\Delta T + bRH \quad (2-21)$$

Tableau 2-26a: Etude de l'influence de l'humidité relative

Modèles adaptatifs	Valeur de p pour le coefficient (a)	Valeur de p pour le coefficient (b)	Régression multilinéaire
HUMPHREY	0.010	0.652	$PMV_{mesuré} = 0.61\Delta T + 0.001RH$
Griffith's G=0.33	0.028	0.477	$PMV_{mesuré} = 0.276\Delta T + 0.002RH$
Griffith's G=0.4	0.025	0.14	$PMV_{mesuré} = 0.458\Delta T + 0.004RH$
Griffith's G=0.5	0.027	0.10	$PMV_{mesuré} = 0.269\Delta T + 0.005RH$
Griffith's G=0.6	0.0208	0.004	$PMV_{mesuré} = 0.57\Delta T + 0.0097RH$
Griffith's G=5	0.85	0.036	$PMV_{mesuré} = 0.02\Delta T + 0.008RH$

Des régressions obtenues, nous avons étudié la significativité des coefficients a et b des équations obtenues. Les modèles de HUMPHREY et de GRIFFITH's de coefficients respectifs 0.33 , 0.4 et 0.5 ont donné des valeurs de p supérieures à 5% pour l'humidité relative, mais inférieures à 5% pour la température. Par conséquent, le coefficient b des régressions correspondantes n'est ici pas représentatif des observations faites sur le terrain. Par conséquent, les modèles de GRIFFITH's associés semblent ne pas suggérer l'influence de

l'humidité relative sur le confort thermique dans cette région. Par contre les modèles de GRIFFITH's de coefficients 0.6 et 5 indiquent ici une influence de l'humidité relative car la valeur de p correspondant au coefficient b des multi régressions correspondantes (équation 2-21) est inférieure à 5%. Quel modèle faudrait-il alors choisir entre les deux meilleurs candidats pour cette région ?

En effet, le modèle de GRIFFITH's de constante 5 nous arrangerait le mieux car la température de confort calculée à l'aide de ce modèle se rapproche au mieux de celle mesurée. Cependant la valeur p du coefficient a dans la régression (tableau 2-26) est supérieure à 5% . Par conséquent la régression obtenue n'est alors pas représentative des observations faites sur le terrain.

Quant au modèle de GRIFFITH's de constante 0.6, les valeurs de p sont significatives aussi bien pour b que pour a. Par conséquent, on dira que le confort adaptatif dans la bande côtière du Bénin pourra être défini par le modèle de GRIFFITH's de coefficient 0.6 (équation 2-22) et l'équation(2-23) :

$$T_c = 0.468T_o + 15.93 \quad (2-22)$$

$$PMV_{mesuré} = 0.57\Delta T + 0.0097RH \quad (2-23)$$

Nous avons ensuite calculé le domaine d'acceptation de confort à 90% correspondant au modèle de GRIFFITH's de constante 0.6.

La sensation thermique mesurée sur le terrain ou le $PMV_{mesuré}$ en fonction de la différence entre la température adaptive de confort et celle mesurée sur le terrain c'est-à-dire en fonction de $\Delta T = t_{a_mesuré} - T_c$ nous permet d'avoir la figure (2-34).

En faisant une régression entre ΔT et $PMV_{mesuré}$, on pourra écrire la relation suivante :

$$PMV_{mesuré} = 0.564\Delta T + 0.700 \quad (2-24)$$

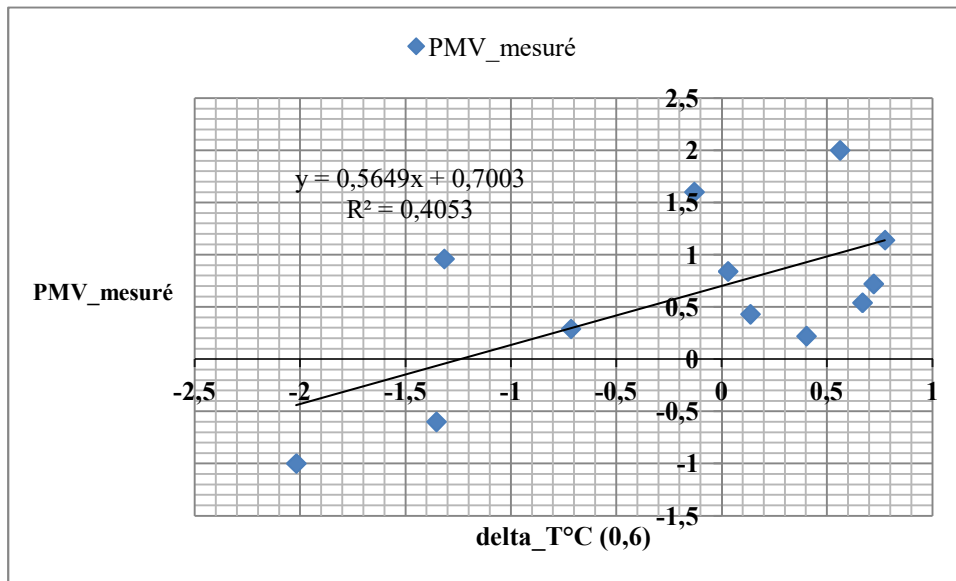


Figure 2-34: PMV_mesuré en fonction de la différence entre la température de confort et celle mesurée en ambiance

Pour trouver le domaine d'acceptation de confort à 9%, il faut alors déterminer ΔT tel que :

$$-0.5 \leq 0.564\Delta T + 0.700 \leq 0.5 \quad (2-25)$$

De cette relation, on détermine les valeurs de ΔT pour lesquelles les limites de confort sont atteintes, soit ± 0.5 et on en déduit le point central qui devient naturellement le point de confort idéal ou neutre.

En posant alors $PMV_mesuré = 0.5$, on trouve $\Delta T = -0.35$. A travers le tableau 2-24, on trouve que -0.13 est la valeur proche de -0.35 . Par conséquent on pourra admettre que la température à laquelle on est à la limite de confort de chaleur est inférieure à 29.7°C . On procède de la même manière pour la limite de confort de fraîcheur soit -0.5 et on trouve que la température correspondante est inférieure à 26.15°C . Par conséquent, la température de confort adaptatif est comprise entre 26.15°C et 30°C , intervalle qui représente le domaine d'acceptabilité de confort à 90%.

Alors, la température de confort idéale ou neutre est sensiblement de 28°C qui n'est pas loin des 28.2°C trouvée comme température idéale ou neutre pour la HAVANE région de climat chaud et humide, par Abel TABALADA et autres.

Tableau 2-26b : Détermination de la zone d'acceptabilité à 90% (Résumé)

			(PMV= -0,5)		(PMV=0,5)		
'Griffiths'	Equation de régression	R ²	ΔT (°C)	t _a (°C)	ΔT (°C)	t _a (°C)	Zone d'acceptation de confort à 90%
0,33	PMV_mesuré=0.283 ΔT +0.16	0.40	-2,48	26,15	1,59	30	26,15°C<t _a °C<30°C ; t _n =28.07°C
0,4	PMV_mesuré=0.456 ΔT +0.32	0.40	-1,63	26,15	0,85	30	26,15°C<t _a °C<30°C ; t _n =28.07°C
0,5	PMV_mesuré=0.273 ΔT +0.36	0.40	-3,45	26,15	0,7	30	26,15°C<t _a °C<30°C ; t _n =28.07°C
0,6	PMV_mesuré=0.564ΔT+0.70	0.40	-2,01	26,15	-0,13	29,7	26,15°C<t_a°C<29.7°C ; t_n=28°C
Humphrey	PMV_mesuré=0.653 ΔT +0.056	0.51	-0.71	26.15	0.98	30	26,15°C<t _a °C<30°C ; t _n =28.07°C
5	PMV_mesuré=0.267 ΔT +0.725	0.51	-3.21	27.47	-0.84	30	27.47°C<t _a °C<30°C ; t _n =28.74°C

Le confort adaptatif prévoyant une température de confort plus élevée que celle prévue par la théorie classique et rationnelle de FANGER, il est représenté sur la figure 2-35 par les points se trouvant au-dessus de la première bissectrice du plan. On en déduit alors que :

L'algorithme de l'adaptatif ne prenant pas en compte l'humidité relative, il semble que son influence sur le processus d'adaptation du corps humain chez l'homme de la bande côtière reste déterminant pour définir la sensation

thermique et par conséquent les conditions de confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés de cette région du Bénin.

Tableau 2-27: Comparaison de la température de confort adaptatif selon le modèle de GRIFFITHS avec $G=0.6$ avec celle FANGER

N°	RH_mes	PMV_mes	ta_mes	tr_mes	Icl_mes	v_mes	T_conf (Griffiths (coefficient $G=0.6$))	T_conf (Fanger PMV_{new})	T_o
1	68.7	0.84	30	29.9	0.55	0.09	29.54	26.8	29.1
2	69.6	0.22	30.7	30.7	0.5	0.15	28.75	27.8	27.4
3	80.4	0.29	28.6	28	0.43	0.06	28.51	24.4	26.9
4	79.4	-0.6	27.4	27.4	0.59	0.28	28.51	25.4	26.9
5	79.5	1.6	29.7	29.9	0.48	0.12	28.51	24.4	26.9
6	71.4	2	31	31.5	0.5	0.11	28.94	26.4	27.8
7	80.4	0.43	30.2	29.5	0.51	0.24	28.94	25.4	27.8
8	70.9	1.14	31.4	31.6	0.47	0.1	28.94	26.4	27.8
9	71.9	0.72	31.3	31.2	0.5	0.09	28.94	26.4	27.8
10	72.1	0.54	31.2	31	0.54	0.09	28.94	25.5	27.8
11	60.34	-1	26.15	26.15	0.52	0.15	29.92	30.4	29.9
12	82.9	0.96	27.47	27.47	0.56	0.15	29.31	22.4	28.6

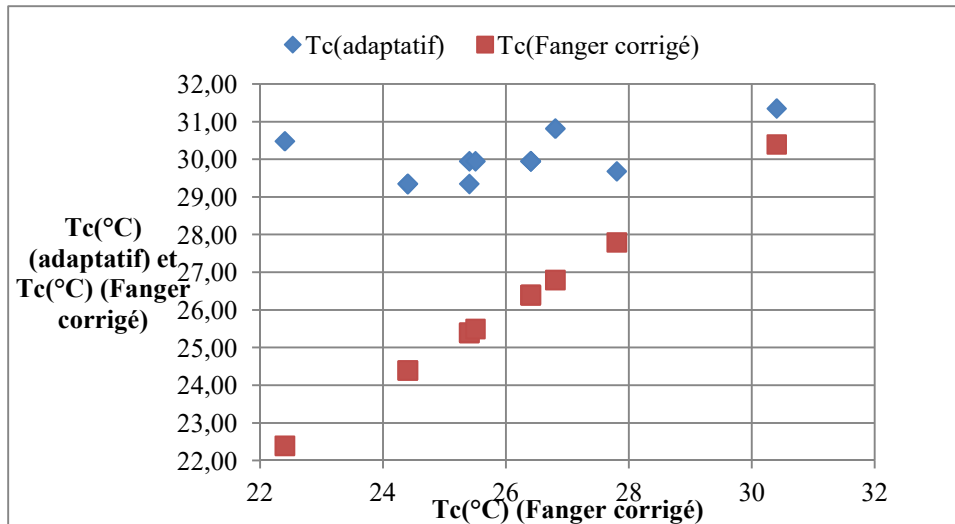


Figure 2-35 : Evolution de confort adaptatif en fonction de la température de confort de FANGER.

- Le modèle de confort adaptatif utilisant la constante de 'Griffiths' 0.6 semble être le mieux adapté pour appliquer l'adaptatif dans la bande côtière du Bénin. Il met en évidence ici l'influence de l'humidité relative. Par conséquent, l'adaptatif appliqué à cette région est déterminé par les équations (2-22) et (2-23).
- La zone d'acceptabilité de confort thermique à 90% en ambiances ventilées dans la bande côtière du Bénin serait comprise entre 26.15°C et 30°C et la température de confort idéale serait de 28°C

II.7.2 Complémentarité entre l'approche classique de FANGER et celle de l'adaptatif

L'approche adaptative du confort étant transitoire, mais ne prenant pas en compte tous les paramètres environnementaux, alors que l'approche classique rationnelle de FANGER stationnaire et ne prenant pas en compte le caractère adaptatif, il serait alors intéressant de les rendre complémentaires. Le développement qui va suivre donne un essai de solution permettant de résoudre de telles insuffisances sans entrer dans le détail.

La sensation thermique de l'homme dans un environnement donné est complexe. Elle peut être représentée comme une boîte noire à l'intérieur de

laquelle s'opèrent plusieurs phénomènes d'ordre physique. En empruntant à l'automatique la démarche de représentation système, le comportement de cette boîte sera parfaitement défini dès lors que l'on pourra construire une relation mathématique existant entre une entrée qui dans le cas présent serait représentée par un stimuli et une sortie. Celui-ci agirait sur le système pour créer une réaction qui sera représentée par la sensation thermique de l'individu en sortie. Ce stimuli, pourrait être représenté par la somme des excitations résultant des paramètres environnementaux à l'intérieur du bâtiment dans lequel se trouve placé l'individu. De ce fait le calcul du PMV_{new} pourra satisfaire à la représentation fonctionnelle de la figure 2-36.

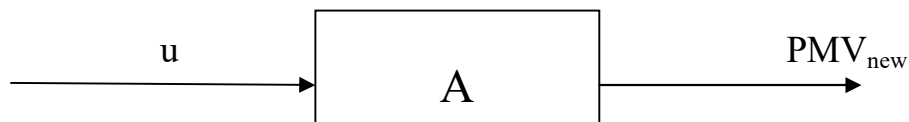


Figure 2-36 : Représentation fonctionnelle sous forme de schéma-bloc de la sensation thermique d'un individu dans une ambiance donnée

Le modèle mathématique A de notre système est représenté par le bilan énergétique du corps humain avec son environnement où les variables physiques dont dépend le PMV_{new} seront considérées comme les paramètres du système. En empruntant toujours à l'automatique les principes de calcul de fonction de transfert ou le calcul dans l'espace fréquentiel du système, on pourra écrire la relation suivante :

$$\frac{PMV_{new}}{u} = A \quad (2.23)$$

Comme l'a remarqué Humphreys, pionnier de l'approche adaptative, l'homme utilise différentes stratégies qui réagissent avec le système (environnement – corps humain) pour atteindre le confort thermique lorsque celui-ci est rompu. C'est l'adaptation. Comme on l'avait déjà énuméré au chapitre 1 de ces travaux, cette adaptation est de trois différents ordres : psychologique, physiologique et comportemental. Elles agissent en retour sur le système et

permettent d'adapter l'individu à son environnement par une auto-régulation. Ce faisant, l'approche adaptative peut être considérée ici comme un effet feedback (chaîne de retour négatif) qui agirait sur le système pour restaurer le confort.

En supposant u_c , le stimuli de confort correspondant aux paramètres de confort recherché ou attendu dans l'environnement, les différentes formes d'adaptation de la chaîne de retour donneront naissance à un stimuli d'adaptation correspondant à un ensemble de paramètres d'ambiance, qui va être comparé au stimuli de confort u_c . De cette comparaison, naîtra une certaine différence de stimuli ou erreur de stimuli, qui excitera le corps pour obtenir la sensation thermique résultante ou un $PMV_{résultant}$. Ce phénomène se répètera jusqu'au moment où le stimuli de confort u_c sera obtenu, donc les conditions de confort attendus. Si l'on suppose que, la température est le paramètre dont dépend le confort par exemple, la chaîne de retour produira au bout du compte un stimuli identique au stimuli correspondant à la température de confort attendu. De ce fait l'erreur ou la différence entre les stimulus sera nulle et par conséquent, il n'y aura aucune action sur le système. On aurait atteint de cette manière, la situation de confort recherchée.

La sensation thermique résultante obtenue en combinant les deux approches du confort thermique, peut être représentée par le schéma fonctionnel de la figure 2-37 :

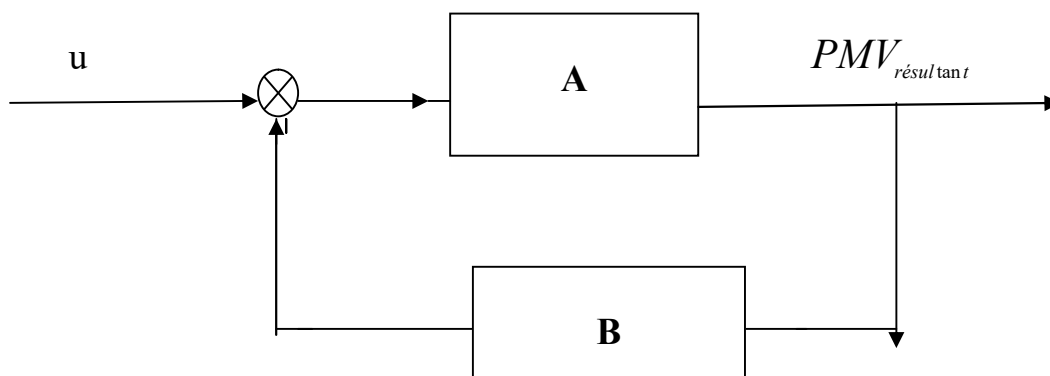


Figure 2-37 : Mise en évidence de l'adaptation dans le schéma-bloc du système

En utilisant le principe des fonctions de transfert des systèmes en boucle fermée, on pourra écrire :

$$PMV_{résultat} = \frac{A}{1 + AB} u = \frac{PMV_{new}}{1 + \frac{B}{u} PMV_{new}} \quad (2.24)$$

Si nous appelons $\gamma = \frac{B}{u}$, on pourra dire que la sensation thermique résultant des deux approches à savoir, l'approche classique de FANGER et l'adaptatif pourra s'écrire de la façon suivante :

$$PMV_{résultat} = \frac{PMV_{new}}{1 + \gamma PMV_{new}} \quad (2.25)$$

En définitive, l'effet de l'adaptation sera de ce fait vu comme celui d'un régulateur proportionnel qui agirait pour adapter le corps humain à l'environnement dans lequel il se trouve.

En analysant la relation (2.25), on constate que si $\gamma = 0$ alors il n'y a pas d'effet d'adaptation. On est alors en présence des conditions stationnaires de FANGER (ambiance bien contrôlée).

Ce résultat avait été trouvé par Runming Yao, 2009 [41], mais définit $PMV_{résultat}$ comme étant le PMV adaptatif. Il schématise alors l'étude du confort thermique par la représentation suivante :

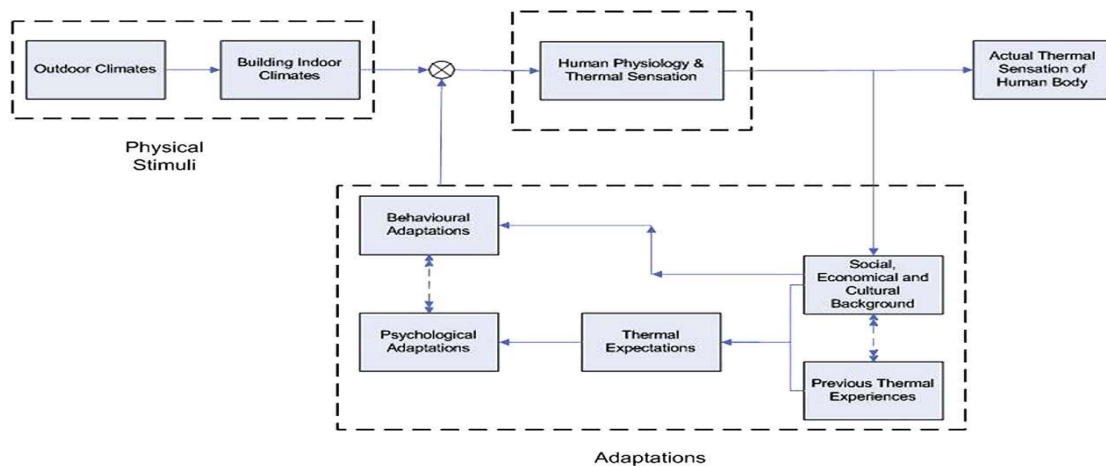


Figure 2-38 : Le modèle systémique du mécanisme du confort [20]

Runming Yao et autres ont déterminé les valeurs de γ qui auraient permis de ramener le système dans la situation de confort attendu. Ils ont obtenu les résultats suivants :

Dans les conditions de chaleur $\gamma = 0.293$ tandis que, dans les conditions de fraîcheur $\gamma = -0.125$

En utilisant ces valeurs, nous avons calculé en fonction des valeurs du PMV corrigé ou adapté de FANGER à la bande côtière du Bénin, le $PMV_{résultant}$ en tenant compte de l'effet d'adaptation (voir figure 2-39).

En observant la figure (2-39), on constate que l'effet adaptatif est vraiment remarquable en ambiance 1 où il fait plus froid. L'effet adaptatif ici apporte un peu plus de chaleur pour améliorer le confort. C'est pour cela que le $PMV_{résultant}$ est plus chaud que le PMV_{new} . Evidemment en ambiances 2 et 3, on constate que les deux sensations (PMV_{new} $PMV_{résultant}$) sont presque identiques. En ces points on dira qu'aucune adaptation n'est nécessaire. Par conséquent, ces ambiances sont dites confortables. En ambiances 4 et 5, on remarque aussi une légère adaptation qui améliore le confort. L'adaptation se remarque surtout dans les ambiances inconfortables.

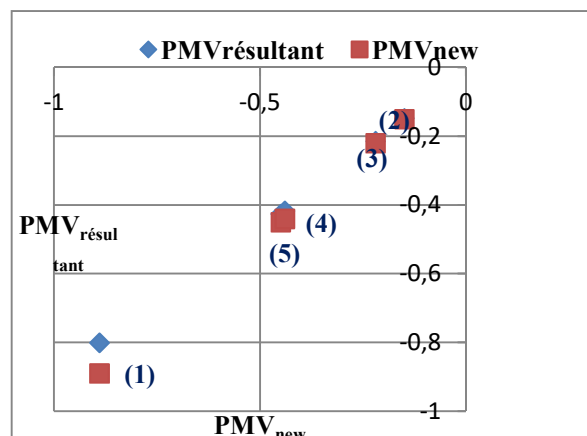


Figure 2-39 : Complémentarité de l'approche adaptative et de celle de FANGER en ambiances climatisées

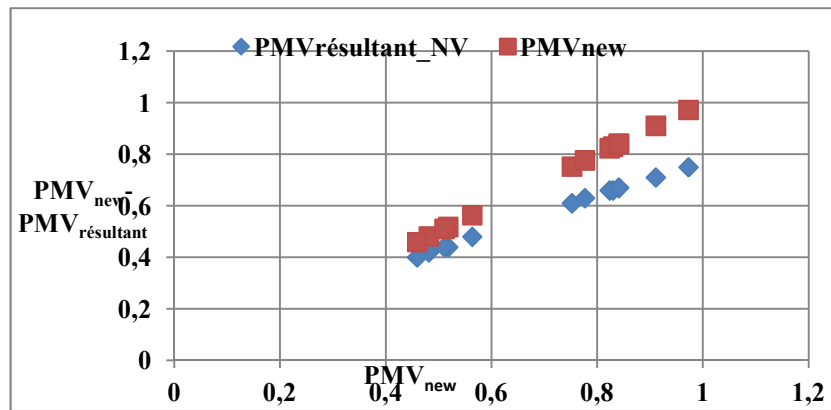


Figure 2-40 : Complémentarité de l'approche adaptative et de celle de FANGER en ambiances naturellement ventilées (NV)

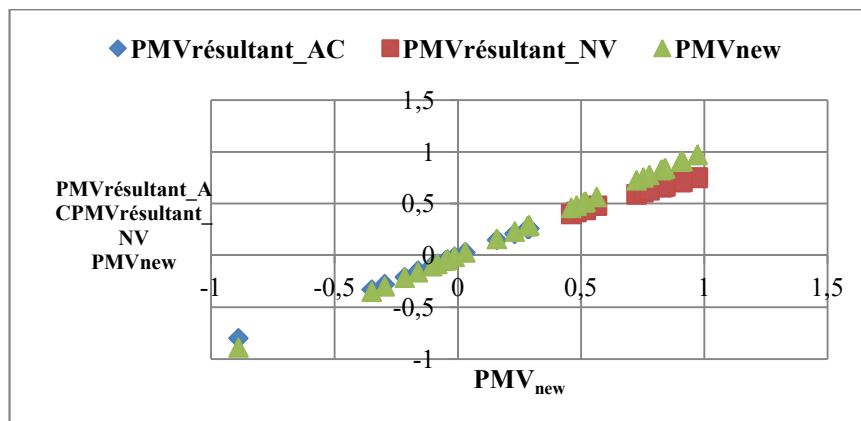


Figure 2-41 : Complémentarité de l'approche adaptative et de celle de FANGER en ambiances climatisées (AC) et en ambiances naturellement ventilées (NV)

En effet, on climatise l'ambiance pour le confort de la majeure partie des occupants. Etant donné qu'il y a souvent un pourcentage d'insatisfaits (très faible), un contrôle de l'ambiance à 100% est pratiquement impossible, on peut supposer qu'en ambiance climatisée, que le PMV_{new} est sensiblement égal au PMV_{resultant}. Par conséquent, on en déduit qu'en ambiance climatisée, l'adaptatif est presque sans effet (figure 2-39).

A travers la figure 2-41, on constate que la sensation thermique résultante n'est pas très différente de celle obtenue par le modèle de FANGER corrigé ou adapté à la bande côtière du Bénin. Cependant il existe en certains points une

discordance entre les deux différentes sensations. En ces points, on remarque que l'effet de l'adaptation tend à faire avoir une sensation moins chaude (le $PM_{résultant}$) et légèrement inférieure à celle de FANGER adapté à la bande côtière du Bénin) ou moins fraîche, (légèrement supérieure à celle de FANGER adapté à la bande côtière du Bénin). C'est l'effet de l'adaptation thermique.

Les ambiances étant des salles de TP et salles de cours, il en existait qui ne sont pas climatisées. On pourrait alors supposer que les points où il y a une adaptation correspondent aux ambiances non ou peu climatisées ($\gamma \neq 0$) tandis que les points où les sensations sont identiques correspondraient aux ambiances où la climatisation est parfaite ($\gamma = 0$).

Aussi, faudrait-il constater ici que l'effet de l'adaptation n'éloigne pas pour autant les sensations thermiques selon FANGER de celle obtenue en combinant les deux approches. Par conséquent, on pourra dire que le coefficient correctif ΔPMV prend en compte dans une certaine mesure les effets de l'adaptation.

II.8 Conclusions

- Le modèle de FANGER surestime la sensation thermique des Africains de la bande côtière du Bénin
- Le modèle de FANGER n'est applicable dans le Sud côtier du Bénin que s'il n'est corrigé. Ainsi, le PMV-PPD de FANGER corrigé, serait suffisant pour apprécier le confort thermique des bâtiments climatisés dans la bande côtière du Bénin.
- Le biais de sensation thermique entre les Européens et les Africains de la bande côtière du Bénin, semblent être lié aux caractéristiques thermo physiologique de la population de cette région et en particulier aux nuances ethniques de leur peau.

- En définitive, il en viendrait que les habitants de la région côtière du sud du Bénin, accepteraient plus les températures élevées que les basses, et seraient plus sensibles à l'humidité relative qu'à la température, contrairement aux personnes vivant dans un climat tempéré. Tout ceci, ajouté au fait que la température soit déjà caractérisée par une faible variation (jour et nuit) dans le sud côtier du Bénin, semble témoigner de la primauté de l'humidité relative sur la température et confère à l'humidité relative, le caractère discriminant du confort thermique dans cette région.
- Ces travaux bien que s'occupant du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments au Bénin, doivent permettre de réfléchir sur la problématique de l'origine de la fréquence des problèmes de la peau et plus précisément celui du cancer de la peau, chez les Européens. Par conséquent, ils doivent donner lieu à la détermination dans les limites admises, de la température optimale à laquelle les bâtiments doivent être chauffés en hiver pour minimiser en même temps l'exposition des Européens aux infrarouges de la température ambiante, et la consommation énergétique des bâtiments!
- Ce faisant, l'implication de ces travaux est alors polyvalente car ils permettent d'apporter d'une part une solution aux problèmes énergétiques et environnementaux et d'autre part rouvrir le débat sur les affections de la peau et plus précisément celui du cancer de la peau chez les personnes de la race blanche.
- Ceci étant, ne pourra – t – on pas envisager désormais le mariage de deux options à savoir: Science de l'Environnement-Energie (Confort thermique des bâtiments) et Sciences de la santé ?

- Ne serait-il pas alors envisageable de revoir la théorie de FANGER en tenant compte des spécificités ethniques ou raciales ? N'est – ce pas ce que voudrait signifier Hope (2002) [42] dans ses travaux lorsqu'il affirme que l'étude du confort thermique doit prendre en compte trois aspects essentiels à savoir : psychologique, thermo physiologique et celui du bilan énergétique du corps humain avec son environnement ?
- L'algorithme de l'adaptatif ne prenant pas en compte l'humidité relative, il semble que son influence sur le processus d'adaptation du corps humain chez l'homme de la bande côtière reste déterminant pour définir la sensation thermique et par conséquent les conditions de confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés de cette région les béninois de la bande côtière
- Le modèle de HUMPHREY et les modèles de confort adaptatif utilisant les constances de 'GRIFFITHS' 0.33 ; 0.4 ; 0.5 et 0.6 et 5 peuvent permettre d'appliquer l'adaptatif dans la bande côtière du Bénin. Le modèle de GRIFFITHS de constance égale à 5 semble être mieux adapté par rapport aux autres.
- La zone d'acceptabilité à 90% de confort thermique en ambiances ventilées dans la bande côtière du Bénin serait comprise entre 26.15°C et 30°C et la température de confort idéale serait de 28.07°C
- L'analyse systémique du confort thermique dans les bâtiments administratifs dans la bande côtière du Bénin met en exergue la complémentarité entre l'approche de FANGER et celle de l'adaptatif et permet de dire que la correction de FANGER à la bande côtière du Bénin prend en compte le caractère adaptatif du confort thermique dans cette région.

- Pour une vitesse de vent de 0.09m/s et un habillement de 0.5clo les couples ($t_a(^{\circ}\text{C})$, RH(%)) suivants (24.90°C , 66%); (25°C , 66%); (24.20°C ,68%); (24.30°C ,68%); (24.40°C ,68%); (24.50°C ,68%); (24.60°C ,68%); (24.70°C ,68%); (24.80°C ,68%); (24.90°C ,68%); (25°C ,68%) sont des paramètres communs de confort de bâtiments administratifs en climat tempéré et dans la bande côtière du Bénin.

CHAPITRE 3 : VITRAGE DANS LES BATIMENTS

III.1 Introduction

Dans un bâtiment, les ouvertures en général et les fenêtres en particulier jouent plusieurs rôles. Elles permettent de :

- laisser pénétrer la lumière ;
- capter l'énergie du soleil et ventiler les espaces ;
- dissiper la chaleur ;
- permettre la vue vers l'extérieur ;
- éviter l'éblouissement ;
- protéger de la poussière ;
- arrêter l'intrusion des insectes ;
- isoler du bruit ;
- protéger du froid et de la chaleur ;
- protéger des intempéries.

Les baies vitrées ont d'abord été utilisées dans les zones tempérées pour préserver l'homme de la fraîcheur afin de lui assurer un confort thermique dans l'ambiance où il vit, avant d'être généralisées au monde entier. Par conséquent, la fenêtre se doit alors d'apporter la lumière et la chaleur ou fraîcheur, tout en limitant les déperditions de chaleur dans les pays du Nord et, à l'inverse, éviter la surchauffe dans les pays du sud. Destinés aux fenêtres dans le bâtiment, les vitrages qui équipent les façades permettent à ces dernières de remplir les fonctions citées ci-dessus. L'élément de base du vitrage est le verre. Il peut être d'origine organique ou inorganique. Celui utilisé pour le vitrage des bâtiments est principalement d'origine inorganique et de production industrielle. Il est fabriqué à partir de :

- Sable de silice (69 à 74%)
- Oxyde de sodium (soude ; 12à 16%)

- Chaux (5à 12%)
- Divers oxydes métalliques (0 à 6%), servant à améliorer ses caractéristiques mécaniques et sa résistance aux agents atmosphériques, ainsi qu'à lui donner sa coloration éventuelle.
- Divers éléments provenant du fait qu'une partie de la matière première est apportée sous forme de verre recyclé.

III.2 Différents types de vitrages existants et mise en œuvre

Pour présenter les principaux types de vitrages, nous allons dans un premier temps présenter les vitrages de base qui ont été améliorés pour donner naissance à d'autres plus performants.

III.2.1 Les principaux vitrages de base couramment utilisés dans le bâtiment

Les vitrages de base le plus souvent utilisés dans le bâtiment sont:

- **Le simple vitrage** (verre recuit)

Il est obtenu à partir du verre plat "float" clair ou coloré. C'est le vitrage de base pour former les vitrages multiples.

- **Le verre armé**

Ce genre de vitrage est obtenu à partir du vitrage simple. Durant la fabrication de celui-ci, on utilise des masses de treillis en acier qui permettent de maintenir les morceaux de verre en cas de brisure

- **Le verre trempé**

Il est aussi obtenu aussi à partir d'un verre plat. Chauffé à une température de 700°C et refroidi rapidement, le traitement thermique permet à ce type de vitrage de résister aux sollicitations extérieures. Le verre trempé obtenu a une résistance environ 5 fois supérieure à celle du verre ordinaire.

Les morceaux de verre trempé brisé ne sont pas dangereux car présentant des arêtes émoussées.

- **Le verre durci**

C'est un verre ayant subi un traitement thermique particulier augmentant sensiblement sa résistance aux contraintes d'origine mécanique ou thermique. Il est aussi parfois appelé semi- trempé.

Ce traitement ne peut se réaliser que sur des verres d'épaisseur inférieure ou égale à 10mm.

Ce type de vitrage présente des caractéristiques de résistance supérieure, à celles d'un vitrage recuit mais inférieure à celles des vitrages trempés (voir tableau 3.1) [62].

Tableau 3.1 : Présentation des caractéristiques mécaniques de différents vitrages

Type de verre	Résistance à la flexion [N/mm ²]	Résistance à la traction [N/mm ²]	Taux de travail [N/mm ²]
Verre cuit	41.2	10	16.5
Verre durci	93	23	31
Verre trempé thermiquement	196	50	49

- **Le verre feuilleté**

Il est composé de deux ou plusieurs feuilles de verre simples ou transformées, assemblées à l'aide d'un ou plusieurs intercalaires plastiques (en général du butyral de polyvinyle ; PVB) ou de résines. En cas de rupture du vitrage, les films PVB retiennent les fragments de verre en place.

En faisant varier le nombre ou l'épaisseur de chacun des constituants, on obtient des vitrages feuilletés de caractéristiques différentes pour répondre à tous les types de sollicitations. Le verre feuilleté possède une nomenclature propre qui permet de reconnaître sa composition. Deux chiffres (minimum)

indiquent l'épaisseur (en mm) des feuilles de verre et sont suivis, après interposition d'un point, d'un chiffre donnant le nombre de plastiques placés entre deux feuilles de verre.

Exemple :

Un vitrage 66.2 correspond à deux feuilles de verre de 6mm d'épaisseur

III.2.2 Transfert de chaleur à travers une fenêtre vitrée

Les vitres que nous venons d'énumérer ont servi à la fabrication de simples vitrages. Ceux-ci sont considérés comme des vitrages de base, qui ont été améliorés pour donner naissance à d'autres plus performants. Les différentes formes de transfert de chaleur à travers une fenêtre sont les principes de base qui sous tendent l'apparition des vitrages plus performants, utilisés aujourd'hui pour la fenestration des bâtiments.

D'un point de vue thermique, le transfert de chaleur au travers d'une fenêtre est basé sur les trois mécanismes que sont la conduction, la convection et le rayonnement.

III.2.2.1 La conduction

La conduction est le moyen par lequel la chaleur se transmet d'un corps à un autre par un contact physique direct par le biais d'une simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides.

III.2.2.2 La convection

On définit la convection comme étant l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact.

Comme dans le processus de conduction, durant la convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones chaudes vers les zones froides.

Lorsque les molécules d'un fluide froid, tel que l'eau ou l'air, viennent au contact d'une paroi chaude, une partie de l'énergie de vibration animant les molécules superficielles du solide se communique aux molécules voisines du fluide.

La quantité de chaleur ainsi transmise est proportionnelle à la différence de température entre paroi et fluide.

III.2.2.3 Le rayonnement

Le soleil qui se trouve à une distance considérable de la terre nous procure une sensation de chaleur. De même, lorsqu'on ouvre la porte d'un four en fonctionnement chez nous, nous sentons une chaleur instantanée qui n'est pas seulement du fait du phénomène de convection de chaleur par le biais de l'espace nous séparant du four, mais du fait surtout du phénomène d'émission d'onde électromagnétique que représente la température de la chaleur venant du four.

Si on place dans une enceinte, deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes, un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques.

Dans chacun de ces cas, la forme d'échange de chaleur mise en jeu ici est désignée par échange de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est une forme d'échange thermique qui se réalise sans que le milieu intermédiaire ne participe à cet échange. Il se réalise par émission et absorption de radiations électromagnétiques, caractérisées par différentes valeurs d'onde. Les éléments essentiels d'un transfert de chaleur par rayonnement sont:

- La conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique

- La transmission de cette énergie électromagnétique par propagation des ondes de proche en proche sans déplacement de matière, mais avec éventuellement absorption par le milieu traversé
- La conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique.

III.2.2.4 Les facteurs caractérisant les échanges thermiques au travers d'un vitrage

a- Coefficients optiques et facteur solaire g

Tout rayonnement électromagnétique frappant un corps quelconque, a une partie qui peut être réfléchi, une autre transmise à travers ce corps et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur

Le vitrage d'une fenêtre, selon sa nature est considéré comme un corps semi transparent. Par conséquent le rayonnement solaire incident ϕ_i qui le traverse se décompose en la somme des flux réfléchi, absorbé par le vitrage et transmis désignés respectivement par ϕ_r, ϕ_a, ϕ_t avec

$$\phi_r = \rho \phi_i, \rho \text{ étant le facteur de réflexion} \quad (3.1)$$

$$\phi_a = \alpha \phi_i, \alpha \text{ étant le facteur d'absorption} \quad (3.2)$$

$$\phi_t = \tau \phi_i, \tau \text{ étant le facteur de transmission} \quad (3.3)$$

Une fois que le verre a absorbé l'énergie, celle-ci est transformée en chaleur, et augmente la température du verre.

En vertu de la loi de conservation de l'énergie, il en vient que :

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (3.4)$$

Le flux absorbé par le vitrage se décompose en deux différents flux réémis soit à l'intérieur soit à l'extérieur (voir figure 2). On peut alors écrire :

$$\phi_a = \phi_e + \phi_e' \quad (3.5) \text{ Avec :}$$

ϕ_e et ϕ_e' les flux de d'énergie réémis respectivement à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment

Le facteur solaire g (ou FS) représente la transmission totale d'énergie à travers le vitrage ; il s'agit donc de la somme du rayonnement transmis et du rayonnement absorbé qui est réémis vers l'intérieur :

$$g = \frac{\phi_e + \phi_i}{\phi_i} \quad (3.6)$$

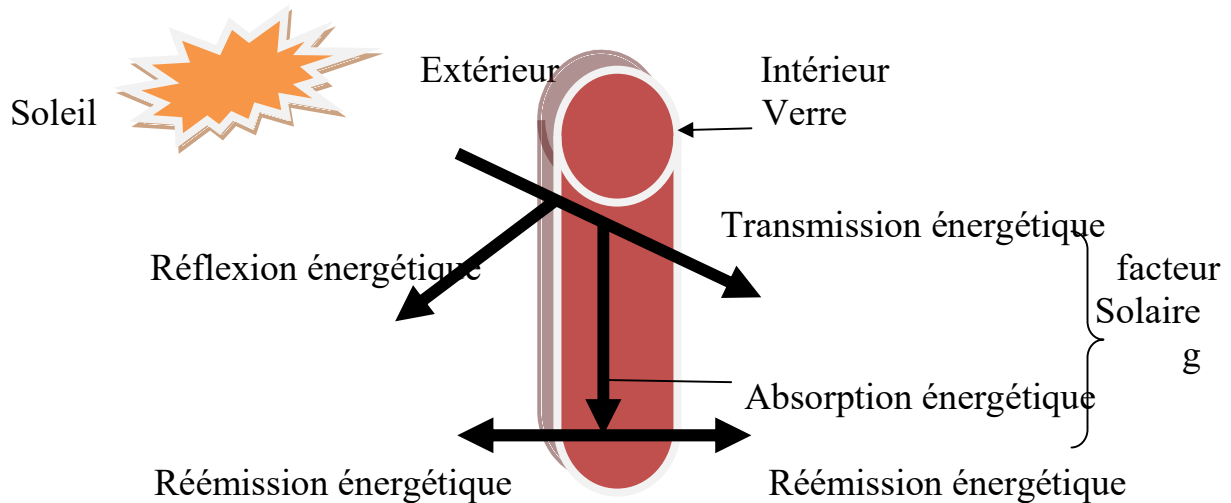


Figure 3.1. Facteur solaire d'un verre

b. Le coefficient de transmission thermique U

La transmission de chaleur ou la déperdition de chaleur à travers un matériau se produit grâce à la différence de température qui règne de chaque côté des parois de ce matériau.

Chaque matériau a une conductivité thermique propre. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage en une seconde à travers un mètre carré de surface de ce matériau, mesurant un mètre d'épaisseur, lorsque la différence de température entre les deux faces est de un Kelvin. Elle s'exprime en W/m.K et est représentée par la lettre grecque λ (lambda).

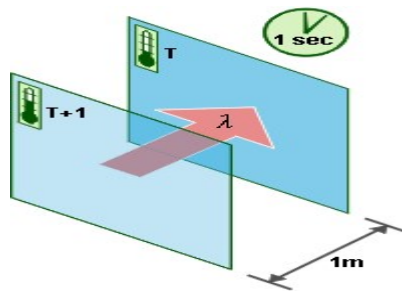


Figure 3.2. Conductivité thermique d'un matériau (Source : [www. Formation-construform.be](http://www.Formation-construform.be))

Coefficient λ de l'air=0.025

Coefficient λ du verre = 1

Plus le coefficient λ tend vers 0, plus le matériau est isolant. Le verre est donc un mauvais isolant thermique.

Le coefficient λ d'un matériau permet de calculer son coefficient de transmission thermique.

En effet, la résistance thermique R d'un matériau est l'expression de son épaisseur en mètre sur sa conductivité thermique.

$R = \frac{e}{\lambda}$ "e" exprimé en mètre. La conductance thermique comme la conductance électrique est l'inverse de la résistance thermique du matériau. Il s'exprime en W/m^2K et est représenté par la lettre U .

$$U = 1/R$$

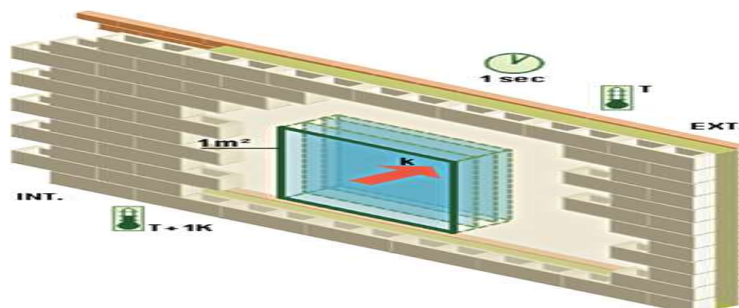


Figure 3.3 : La transmission thermique d'un vitrage (Source : [www. Formation-construform.be](http://www.Formation-construform.be))

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est la quantité de chaleur qui traverse cette paroi en régime permanent par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi

Pour le verre, le coefficient U_g (glass) est défini selon la norme européenne EN 673 et tient compte des échanges superficiels " h_e et h_i " comme dans tous les calculs d'isolation thermique.

En plus des propriétés thermiques propres aux matériaux, le facteur U dépend des conditions climatiques comme par exemple le vent. Si la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur est plus importante que 1°C , on peut également observer une différence de facteur U par rapport aux valeurs mesurées en conditions standards ou calculées. La position du vitrage (vertical ou penché) peut aussi affecter son facteur U . Des conditions standards ont été déterminées afin de permettre de comparer les mesures réalisées dans les différents laboratoires.

Le coefficient U souvent aussi appelé K d'une fenêtre dépend du coefficient $U(K)$ du vitrage lui-même, des effets de bord qui apparaissent surtout dans le cas d'un double ou d'un triple vitrage et du coefficient $U(K)$ du châssis.

Le facteur $U(K)$ d'un vitrage dépend principalement du nombre de couches de verre, de la dimension de(s) l'espace(s) séparant ces couches de verres, du type de gaz qui remplit ces espaces et de la présence d'éventuelles couches déposées sur le verre.

En général, quand on parle du facteur $U(k)$ d'un vitrage, on se réfère au coefficient $U(K)$ mesuré ou calculé au centre de celui-ci. Le calcul de la transmission thermique d'un système de vitrage se définit à l'aide de l'équation suivante

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \sum_{j=1}^N \frac{e_j}{k_j} + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{1}{h_{c,j}} + \frac{1}{h_{int}}} \quad (3.7)$$

tel que :

$h_{ext/int}$: le coefficient du transfert de chaleur pour la surface extérieure/intérieure en $(W / m^2 .K)$

N : nombre de couches du système de vitrage.

k : conductivité thermique du verre $(W / m.K)$

h_c : coefficient de transfert de chaleur de la cavité $(W / m^2 .K)$

e : l'épaisseur du verre (m)

III.2.2.5 Propriétés des vitrages par rapport au transfert d'énergie et amélioration des performances des vitrages.

Comme nous l'avons énoncé ci – dessus, le rayonnement solaire au travers d'un vitrage peut être réfléchi, absorbé, ou transmis. Ces trois propriétés sont à la base des caractéristiques et performance de tout vitrage. En manipulant l'un ou l'autre de ses caractéristiques, on peut augmenter les performances d'un vitrage.

a. La réflectivité et vitrages réfléchissants

La réflectivité naturelle d'un vitrage est une propriété optique du vitrage. Cette propriété dépend de la qualité de la surface du verre et de la présence ou non d'une ou plusieurs couches. L'angle d'incidence selon lequel le rayonnement solaire atteint le verre définit la quantité de lumière réfléchi par le vitrage. Plus grand est l'angle sous lequel la lumière du soleil atteint le vitrage, plus la quantité de lumière réfléchi par le verre sera importante (voir figure 3.4.)

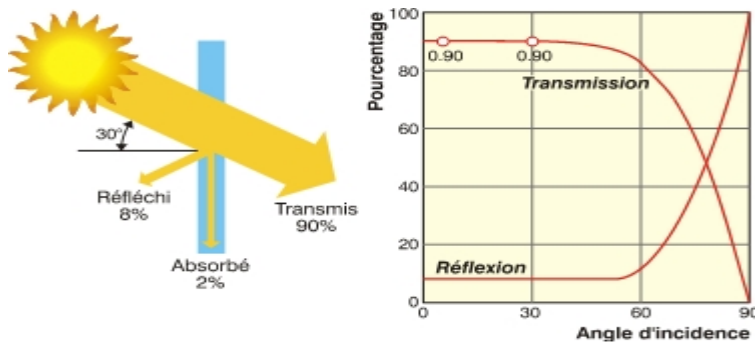


Figure 3.4 : Evolution du pourcentage du rayonnement solaire réfléchi et transmis en fonction de l'angle d'incidence (Source : [www. Formation-construform.be](http://www.Formation-construform.be))

Le coefficient de réflexion ρ d'un vitrage peut être augmenté en appliquant différentes couches métalliques sur sa surface. On modifie ainsi la fonction optique du vitrage.

La plupart des couches réfléchissent l'entièreté du spectre. Des couches ayant des coefficients de réflexion variables selon qu'il s'agisse de rayonnements infrarouges à grande ou courte longueur d'onde permettent de créer des vitrages spécialement adaptés aux climats froids ou aux climats chauds. Ce sont des vitrages à couches sélectives. On utilise pour cela des couches d'oxydes métalliques qui augmentent la réflexion des UV, des IR de l'énergie solaire incidente et diminue à fortiori, la part d'énergie transmise. On obtient ainsi des vitrages à couches, mais réfléchissants. En diminuant de cette façon l'énergie transmise par le soleil au travers du vitrage, on diminue alors le facteur solaire.

b. Emissivité et vitrages à basse émissivité

Quand de la chaleur ou de l'énergie solaire est absorbée par un vitrage, elle est réémise par le vitrage, soit par convection d'air le long de sa surface, soit par rayonnement de la surface du vitrage vers les autres surfaces.

La capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative est appelée son émissivité. Les fenêtres, ainsi que les matériaux que l'on trouve

habituellement à l'intérieur d'un bâtiment, émettent typiquement des radiations sous forme d'infrarouges de grande longueur d'onde. Cette émission de chaleur radiante représente un des plus importants modes de transfert de chaleur pour une fenêtre. Par conséquent, la réduction du flux de chaleur émis par les fenêtres sous forme de radiations peut améliorer fortement ses propriétés isolantes.

Les vitrages standards ont une émissivité de 0.84 sur l'entière du spectre. Cela signifie qu'ils émettent 84 % de l'énergie possible pour un objet à cette température. Cela signifie également qu'en ce qui concerne les rayonnements à grande longueur d'onde qui frappent la surface du verre, 84 % est absorbé et seul 16 % est réfléchi.

En effet, le pouvoir isolant du vitrage peut encore être amélioré en travaillant sur l'émissivité du verre. Un dépôt de couche métallique de faible épaisseur et de faible émissivité sera plus réflecteur pour le rayonnement infra rouge que pour le rayonnement visible. On pourra ainsi obtenir des vitrages à couche sélective, mais à basse émissivité avec un facteur solaire réduit

c. Transmissivité

Les vitrages se différencient aussi par leur transparence par rapport à des différentes parties du spectre.

La plupart des verres sont partiellement transparents aux ultraviolets. Le verre est opaque aux rayonnements infrarouges à grandes longueurs d'onde mais généralement transparent aux infrarouges à courte longueur d'onde.

La transmissivité est la quantité de rayonnement qui peut traverser un vitrage. Elle peut être définie pour différents types de lumière ou d'énergie, par exemple, on parle de transmissivité dans le domaine du visible, par rapport aux ultraviolets ou par rapport au spectre solaire total. Chacun de ces termes décrit une caractéristique différente du vitrage.

Dans le domaine du visible, elle décrit la possibilité du vitrage à fournir de l'éclairage naturel et à permettre la vue au travers de la fenêtre. Par exemple, un vitrage teinté aura une transmissivité ou un coefficient de transmission lumineuse plus faible qu'un vitrage clair. La majeure partie de l'énergie solaire étant invisible à l'œil elle nous atteint soit sous forme de rayons ultraviolets (UV) ou, majoritairement, sous forme d'infrarouges proches, la transmissivité par rapport à l'entièreté du spectre solaire décrit comment le vitrage répond à une part plus large du spectre et de ce fait paraît plus intéressant pour caractériser la quantité d'énergie solaire transmise par un vitrage.

III.2.3 Les vitrages multiples

Le double vitrage

Si l'on considère par exemple un simple vitrage de 4mm d'épaisseur, on trouve par calcul [63] que son coefficient de transmission est $U=5.8\text{W/m}^2\text{K}$ et un facteur solaire de 0.86. Ceci voudrait dire que le simple vitrage transmet 86% du rayonnement solaire et n'en réfléchit à l'extérieur que 14%.

En effet, le double vitrage consiste à enfermer entre deux verres une lame d'air déshydraté ou un gaz améliorant l'isolation thermique (souvent de l'argon). Du fait de cet isolant, le coefficient de transmission thermique devient faible. Les deux verres sont séparés par un intercalaire en aluminium ou en acier. L'étanchéité périphérique est assurée par des joints organiques. Des agents déshydratants sont contenus dans l'intercalaire.

Le calcul du coefficient de transmission pour un double vitrage composé de deux parois de verre de 4mm et d'une lame d'air de 12mm d'épaisseur donne une valeur de $U=2.8\text{W/m}^2\text{K}$.

On constate alors qu'avec un double vitrage, le coefficient de transmission thermique diminue de plus de la moitié par rapport à un simple vitrage grâce à la lame d'air inerte prisonnière entre les deux vitres. En revanche, son facteur

solaire diminue aussi sensiblement. Plus le vitrage est isolant, plus le facteur solaire et la transmission lumineuse diminuent.

Le dessiccateur introduit dans l'intercalaire est destiné à assécher le gaz comprimé, à la fermeture du vitrage et à absorber la vapeur d'eau éventuelle. Le bon fonctionnement des barrières d'étanchéité et du dessiccateur conditionne la durée de vie du vitrage. La composition des doubles vitrages est donnée par 3 valeurs (en mm).

Exemple : 4/12/4 : l'épaisseur de la feuille extérieure/épaisseur de l'intercalaire / l'épaisseur de la feuille de verre intérieure

Un vitrage 4/12/66.2 correspond à un double vitrage composé d'un vitrage feuilleté 66.2, d'un intercalaire de 12mm rempli d'air et d'un verre simple de 4mm d'épaisseur.

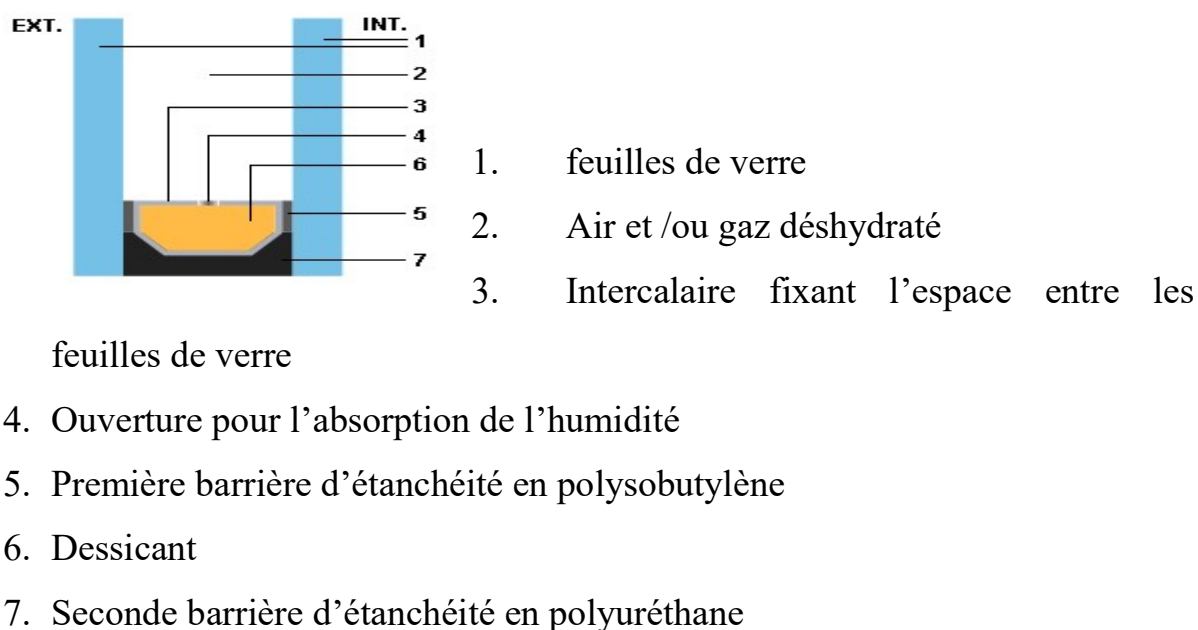


Figure 3.5. Le double vitrage

La valeur U beaucoup plus basse d'un double vitrage ordinaire par rapport à un simple vitrage ne provient pas de la quantité plus grande de verre utilisé mais de l'espace d'air sec entre les plaques de verre. Celui-ci est responsable de 70% de l'isolation thermique [64].

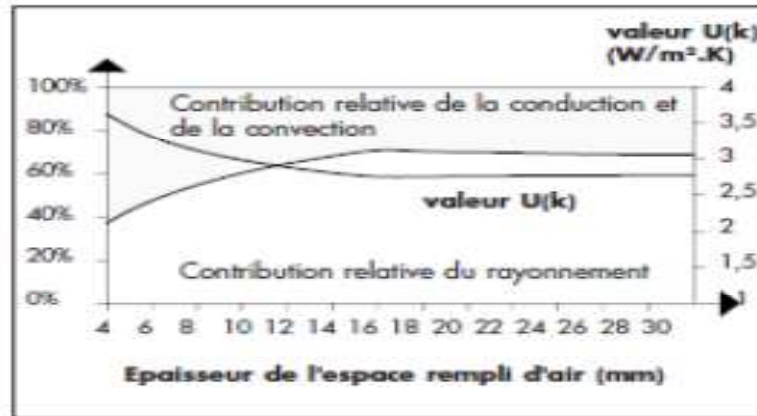


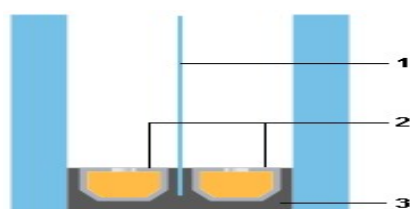
Figure 3.6 : Influence de l'épaisseur sur la valeur de U

La figure 3.6 montre l'influence de l'épaisseur de l'espace rempli d'air dans un double vitrage sur la contribution du rayonnement par rapport à la conduction et la convection, et sur la valeur U du double vitrage. Au-delà de 16 mm, la valeur de U ne s'améliore plus.

On peut améliorer l'isolation thermique du double vitrage en remplaçant l'air sec par un gaz au pouvoir isolant élevé. Le plus souvent, on utilise l'argon, le krypton et le xénon.

III.2.3.2 Le triple vitrage

Il est possible d'améliorer la valeur U du vitrage en ajoutant une troisième, voire une quatrième plaque de verre. On obtient alors un meilleur pouvoir isolant, mais également une augmentation de l'épaisseur totale et du poids du vitrage. En outre, les transmissions lumineuses et solaires diminuent. Une variante consiste en un double vitrage avec un ou plusieurs films plastiques dans l'espace d'air, de façon à avoir plusieurs lames d'air sans augmenter le



1. Film tendu

poids du vitrage.

2. Intercalaire métallique
3. Mastic thermodurcissable

Figure 3.7. Triple vitrage

Comme on le voit dans le tableau 3.2, on obtient une amélioration de la valeur de U qui diminue du simple aux multiples vitrages, mais également une augmentation de l'épaisseur totale et du poids du vitrage. Par contre les transmissions solaires et lumineuses diminuent.

Tableau 3.2 : Caractéristiques typiques de différents vitrages

Description	Epaisseur (mm)	Composition (mm)	Poids (kg/m ²)	U (W/m ² .K)	g	τ_v
Simple vitrage	4....6		10....15	5.7	0.85	0.90
Double vitrage	20	4-12-4	20	2.9	0.75	0.80
Triple vitrage	28	4-8-4-8-4	30	2.1	0.67	0.73
Quadruple vitrage	46	4-10-4-10-4-10-4	40	1.3	0.59	0.66

4. Vitrage à couches

Pour présenter les vitrages à couches, on devra d'abord définir les verres à couches.

On entendra par verre à couche, les verres revêtus d'une couche mince, en général d'oxydes métalliques. L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 10 nanomètres à 800 nanomètres. . On peut être amené à utiliser un empilement de couches. Le rôle de cette couche est de modifier le comportement optique, chimique, électrique ou mécanique des verres. Nous allons nous intéresser ici à des couches dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 1 micromètre.

III.2.4.1 Modification de la fonction optique : Vitrage basse émissivité – Vitrage Réfléchissant

La couche modifie le comportement optique du verre, dans le domaine visible et/ou dans le domaine de l'infrarouge.

En effet, le pouvoir isolant du vitrage peut encore être amélioré en travaillant sur l'émissivité du verre. Comme on l'a vu plus haut, un dépôt métallique de faible épaisseur et de faible émissivité sera plus réflecteur pour le rayonnement infra rouge que pour le rayonnement visible. En appliquant sur une des deux faces intérieures d'un double vitrage, une couche (invisible) extrêmement fine de quelques nanomètres dont le facteur d'émissivité est très faible, une grande partie du rayonnement infrarouge lointain, à grande longueur d'onde sera réfléchi.

La position de la couche basse émissivité à l'intérieur du double vitrage a son importance (figure 3.13). Il convient de numéroté les faces de 1 à 4 en partant de l'extérieur vers l'intérieur pour définir sa position. Placée en face 2, la couche basse émissivité diminuera le facteur solaire. Placée en face 3, la couche basse émissivité laisse passer le rayonnement solaire. La chaleur absorbée par le vitrage est réémise vers l'intérieur.

Il existe des vitrages réfléchissants permettant le contrôle solaire. On adjoint à la couche basse émissivité en face 3 une autre couche en face 2 d'oxydes métalliques qui augmente la réflexion des UV et des IR de l'énergie solaire incidente et diminue à fortiori, la part d'énergie transmise



Figure 3.8 : Application des couches sur les façades du vitrage

Le dépôt métallique est un mince film métallique ou d'oxyde métallique. Il existe deux méthodes pour appliquer la couche métallique :

- Par pyrolyse

Un revêtement est appliqué en plusieurs couches par chauffage pendant que la température du verre est encore au voisinage de 600°C . Le verre peut être trempé après le dépôt de la couche. Le résultat en est un revêtement d'oxyde métallique "dur" très résistant, plus commode à manipuler. La trempe thermique de ces verres de type pyrolytique est plus délicate que celle des verres non traités. En effet, la trempe thermique pose des problèmes engendrés par la dissymétrie de rayonnement des deux faces (revêtue et non revêtue). La chauffe symétrique nécessaire pour éviter une déformation du verre impose des consignes de chauffage différenciées sur les deux faces. De plus, pour ne pas dégrader la couche à faible émissivité, la température atteinte avant refroidissement ne doit pas dépasser 600°C (contre près de 650°C pour la trempe thermique d'un verre clair classique). Il en résulte qu'un refroidissement plus rapide s'impose pour obtenir un verre trempé. En industrie, les verres revêtus de couches de type pyrolytique sont appelés verres à couches classe A

- Par pulvérisation

Ce revêtement est appliqué à l'aide d'un procédé de pulvérisation cathodique renforcé par effet magnétique sous vide très poussé (dépôt PVD magnétron). Il se crée de cette manière un revêtement métallique "tendre". Il existe deux

méthodes de pulvérisation, abstraction faite des considérations techniques. On parle de pulvérisation I pour la première méthode et de pulvérisation II pour la deuxième. La pulvérisation I, permet d'obtenir des valeurs d'émissivité ϵ inférieures à 0.10, alors que la pulvérisation II, quant à elle permet d'obtenir des valeurs d'émissivité ϵ de 0.04 au maximum, pendant que l'émissivité d'un verre usuel non traité est de l'ordre de 0.8 à 0.9. Le tableau 3.3, montre une amélioration de la valeur U avec l'argon par rapport à l'air sec du fait du pouvoir isolant élevé de l'argon et du procédé d'application de la couche

Tableau 3.3 Comparaison des valeurs de U des vitrages revêtus de couche basse émissivité

Remplissage de l'espace	Deux plaques de verre de 4,5 ou 6mm et				
	Air sec	Air sec	Air sec	Argon	
Coating	Néant	Pyrolyse	Pulvérisation I	Pulvérisation I	Pulvérisation II
Espacement 9mm	3.2	2.2	2.1	1.8	1.5
Espacement 12mm	2.9	2	1.8	1.5	1.3
Espacement 15mm	2.8	1.8	1.6	1.4	1.1

III.2.4.2 Modification de la fonction électrique : Le vitrage électrochrome

En utilisant un dépôt d'oxyde métallique (oxyde mixte d'indium et d'étain appelé ITO) transparent à la lumière visible mais conducteur de l'électricité, on obtient un vitrage électrochrome.

L'oxyde mixte ITO est un semi conducteur de type n (la conduction électrique a lieu par électron) fortement 'dégénéré'. Ce matériau est faiblement conducteur électronique, mais reste transparent à la lumière. Le vitrage électrochrome est un vitrage sur lequel a été déposé un oxyde métallique transparent à la lumière et qui a la particularité de changer les propriétés optiques du verre sous l'effet d'un champ électrique. Ce type de vitrage est dit actif et intelligent et permet de mieux optimiser le confort thermique. Il s'agit d'un vitrage qui tantôt peut devenir translucide, tantôt opalin, permettant ainsi une intimité variable.

Ce type de vitrage est composé de deux verres entre lesquels est placé un film dont les deux faces sont recouvertes d'une couche métallique parfaitement conductrice d'électricité. Des cristaux liquides sont emprisonnés dans ce film, et les deux couches sont reliées à un conducteur électrique.

Lorsque aucune tension électrique n'est imposée au système, les cristaux liquides ne sont pas alignés et leur position désordonnée entraîne une diffusion de la lumière dans toutes les directions : le vitrage apparaît alors sous la forme d'un blanc laiteux, opaque à la vision. Par contre, dès qu'un champ électrique est établi entre les deux couches métalliques, les cristaux liquides s'alignent et le verre devient transparent sous l'effet d'un champ électrique. On les appelle aussi des vitrages 'obturateurs' à cristaux liquides.

La réalisation de ce type de vitrage se fait de la façon suivante :

On dispose d'un liquide comprenant un mélange de molécules cristaux liquide, de molécules polymérisables et d'une petite quantité de billes de silice de très petit diamètre (quelques microns). Celui-ci est versé sur la face d'une vitre devenue conductrice par le dépôt d'un oxyde métallique (on utilise souvent le dépôt d'oxyde d'étain et d'indium). Une deuxième vitre dont la face interne est rendue conductrice par le dépôt d'un oxyde métallique est appliquée sur le film liquide. On obtient la structure de la figure suivante :

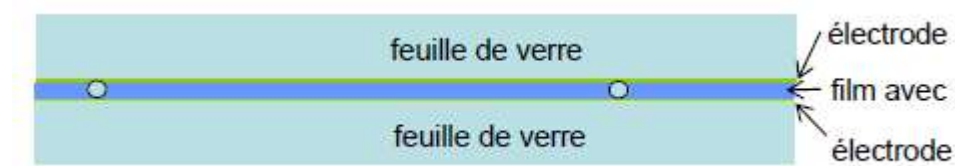


Figure 3.9: Structure d'un vitrage obturateur

Le film mince s'est formé au moment de la polymérisation. Il renferme de fines gouttelettes de cristaux de liquide. Au moment de la polymérisation, une séparation s'opère entre les molécules de cristaux de liquide et les molécules monomères.

A l'intérieur d'une gouttelette, les molécules de cristaux sont orientées les unes par rapport aux autres. Du point de vue optique, une gouttelette est anisotrope. Cette anisotropie est caractérisée par la présence d'un axe optique correspondant à la direction d'alignement des molécules de cristaux liquides dans la gouttelette. Au repos, les axes optiques des gouttelettes sont distribués au hasard et la lumière est diffusée (le vitrage est opaque et translucide).

Sous l'effet d'un champ électrique, les axes optiques des gouttelettes sont alignés, le film apparaît homogène au rayonnement incident et la lumière n'est plus diffusée (le vitrage devient transparent). Le vitrage redevient translucide lorsque la tension électrique est supprimée.

A l'inverse du vitrage obturateur à cristaux liquides, l'application du courant électrique pendant un certain temps rend le vitrage sombre, s'il était initialement transparent ou clair. Si le courant électrique est supprimé, le vitrage reste sombre. Pour rendre le vitrage à nouveau transparent, il suffit d'appliquer un courant électrique en sens inverse. Ce type de vitrage va passer de l'état clair avec une transmission lumineuse et un facteur solaire g élevés (tous les rayonnements solaires passent à un état foncé) transmission faible dans le visible et dans l'infrarouge. Une commande au tableau de bord peut permettre d'ajuster l'opacité sur 5 niveaux, depuis l'état 'clair' jusqu'à l'état très sombre. On parle de vitrage 'électrochrome assombrissant'

La structure du vitrage assombrissant ressemble à celui du vitrage obturateur : le film mince électrochrome est placé entre deux feuilles de verre. La face interne de chaque feuille de verre est rendue conductrice par le dépôt d'un oxyde métallique. Ces films de dépôt métallique servent d'électrodes transparentes. Le changement contrôlé de transparence est basé sur le changement de composition d'un film mince (oxyde de tungstène WO_3) entraînant un changement d'absorption optique (voir figure). Ce système est commandé par un courant continu. Initialement le film WO_3 est transparent. L'application d'une tension électrique entraîne la migration d'ion métallique M^+ vers la couche d'oxyde de tungstène qui change de composition et devient absorbante (bleu foncé). Si la tension est supprimée, le vitrage reste sombre. Pour revenir à l'état clair, il suffit d'appliquer une tension électrique en sens opposé.

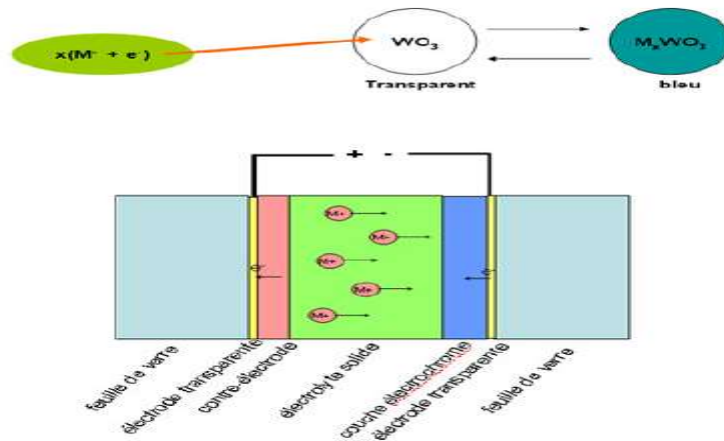


Figure 3.10: Principe de fonctionnement d'un vitrage électrochrome (source [64])

Trois technologies permettent de mettre en œuvre les vitrages électrochromes : la technologie inorganique, organique et celle des polymères.

La technologie inorganique consiste à utiliser le dépôt successif d'une série de couches minces ayant chacune un rôle bien précis (électrodes d'amenée de courant..), tandis que la couche organique utilise un gel comme milieu électro-actif et souffre de faibles performances de durabilité propres à la matière organique.

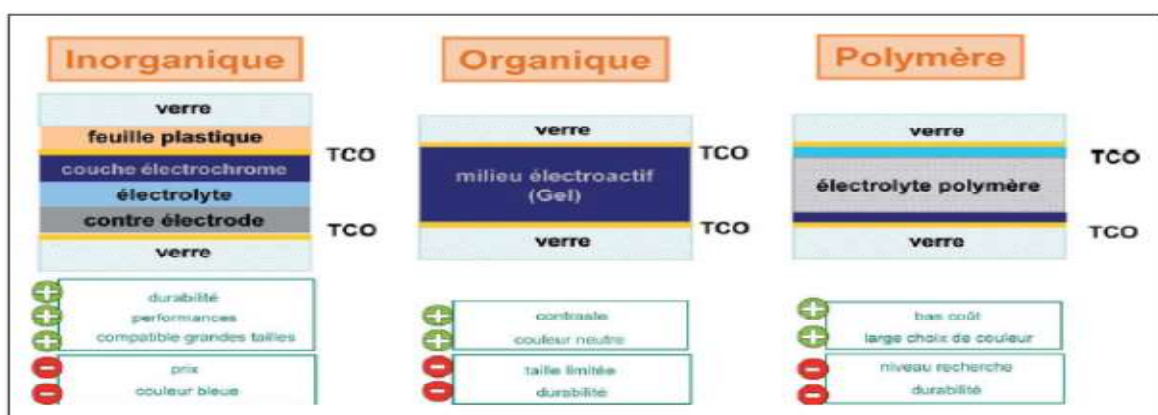


Figure 3.11 : Technologies de mises en œuvre des vitrages électrochromes

III.3 Etat des recherches sur le vitrage

Comme le stipule Juliette Ruchmann [65], l'avenir des vitrages implique la chimie. C'est d'ailleurs ce qui se remarque avec les vitrages chromogènes qui semblent offrir plusieurs possibilités pour concilier la qualité de vie dans les bâtiments et la sobriété énergétique.

En effet, plusieurs films sont actuellement actifs dans le proche InfraRouge. Au Massachussets Institute of technology(MIT), les résultats de certains travaux de recherche ont permis de mettre au point un matériau formé de nanocristaux piégés dans une matrice de nobium qui a la possibilité de changer d'état en fonction du voltage appliqué pour respectivement laisser bloquer ou laisser le rayonnement InfraRouge [66]. Le matériau est naturellement transparent. A l'interface des nanocristaux d'indium et de la molécule de niobium, l'application d'une faible tension provoque un réarrangement structurel de la matrice qui laisse plus ou moins passer les charges électriques et donc la lumière. Une variation de seulement de 2.5volts rend le matériau filtrant vis à vis du spectre visible, ou du proche Infra Rouge. De ce fait, le vitrage électrochrome obtenu a l'intérêt de laisser passer facilement par trois états : transparence totale pour profiter de la lumière et de la chaleur. , blocage du proche InfraRouge pour réduire les besoins de climatisation, ou blocage simultané de la lumière visible et de l'Infra Rouge

La thermochromie va semble – t-il, avoir une part importante à prendre dans cette innovation. En effet, comme relevant de la chimie, elle permet aux matériaux de changer leurs propriétés optiques en fonction de la chaleur et ceci de manière réversible ou quasi réversible. Dans la vie courante, cette technologie a déjà eu plusieurs applications. Parmi celles-ci, nous pouvons citer, la traçabilité au niveau de chaîne de froid, la sécurité des personnes etc..

L'effet thermochrome appliqué au vitrage, permet le passage d'un état transparent vers un état plutôt sombre ou réfléchissant au-dessus d'une certaine température. La température correspondant à ce changement d'état se situe vers quelques centaines de degrés. Aujourd'hui, la tendance serait de trouver un matériau présentant l'effet thermochrome au voisinage de la température ordinaire.

Evidemment, il est possible de déposer un film thermochrome de nature organique sur une vitre en verre pour obtenir un vitrage thermochrome. Certaines méthodes sont testées en laboratoire. Les vitrages thermochromes obtenus ont un pouvoir sélectif pour la lumière et pour le rayonnement Infra Rouge. Les propriétés optiques sont affectées par suite du changement de phase (passage de l'état semi-conducteur clair vers un comportement de type métallique absorbant). Un des inconvénients de la réalisation de ces types de vitrage est que les températures de transformation sont plutôt élevées. Les films thermochromes sont aussi des oxydes métalliques. Parmi ces oxydes, l'oxyde de vanadium serait le plus intéressant. L'effet thermochrome est ici provoqué par le changement de comportement semi conducteur vers le métal et ceci de façon réversible rendant le matériau transparent à basse température et absorbant à température élevée. La température de transformation (état absorbant) est de 68°C, ce qui est déjà trop élevé. Cependant, lors de la transition, la transmission optique dans l'InfraRouge (longueur d'onde supérieure ou égale à 3micron mètre) passe de 70% à 30%, alors que la transmission dans la partie visible du spectre est peu affectée.

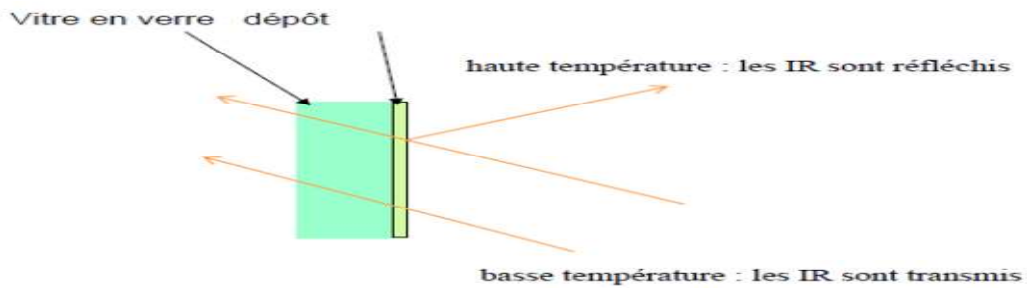


Figure 3.12 : Structure d'un vitrage thermochrome

Ce type de vitrage serait d'une importance capitale si l'on pouvait diminuer la température de transformation très élevée à la température ordinaire. De cette façon ce type de vitrage serait plus recommandé car à basse température, il aurait permis de transmettre les InfraRouges à l'intérieur du local, ce qui élèverait la température en hivers et réfléchirait les InfraRouges l'été, ce qui aurait permis de bien se passer de la climatisation. De cette façon, on aurait réalisé un vitrage intelligent pour lequel le contrôle solaire s'ajusterait en fonction de la saison.

Par dopage de l'oxyde de vanadium VO_2 , il est possible de modifier la température de transition T_c et obtenir une température de transition de $+10^\circ\text{C}$ jusqu'à 70°C . Un dopage de l'oxyde de vanadium avec 1.9% de tungstène abaisse la température vers 29°C . L'inconvénient vient du fait de l'abaissement de transparence pour la lumière dans le visible et une légère tendance à être coloré en jaune. La recherche actuellement étudie le mode de dépôt de l'oxyde de vanadium qui permettrait d'abaisser la température jusqu'à 30°C sans trop altérer la transparence du vitrage.

De grands progrès sont en train d'être réalisés. Ils consistent à étudier le dépôt de couches multiples et un contrôle de l'épaisseur. Parmi ces progrès, un mode dépôt de l'oxyde de vanadium formé en de petits grains de très petites tailles permet d'abaisser la température de transformation de 68°C à 30°C , ce qui semble déjà bon pour une application au vitrage.

Une nouvelle innovation consiste à envisager un film constitué d'une solution de polymère et d'eau prise en sandwich entre deux films minces de polymère. Ce film est pratiquement transparent à basse température, mais laisse passer peu la lumière si la température dépasse une certaine valeur.

Une autre variété de vitrage thermochrome peut être obtenue à partir de vitrages feuilletés. La couche intermédiaire est un polymère dopé avec des complexes de métaux de transition qui permettent de modifier la transmission et la couleur du film polymère sous l'effet de la température.

III.4 Cas de l'Afrique et de la bande côtière du Bénin

En Afrique, il existe sept zones climatiques. Ce sont :

- la zone méditerranéenne,
- la zone désertique,
- la zone sahélienne,
- la zone tropicale à saison sèche,
- la zone tropicale humide,
- la zone tropicale équatoriale
- et celle des hautes altitudes

Ces sept zones sont simplifiées en deux zones climatiques majeures : celle du climat "chaud et sec" qui correspondent aux zones méditerranéennes et tropicales et celle du climat "chaud et humide". En plus du climat, la construction des bâtiments prend en compte certains éléments comme la mitoyenneté, l'implantation, le choix du terrain, l'orientation, la volumétrie et la forme.

En fonction de ces éléments, trois types de constructions sont rencontrées en Afrique. Elles diffèrent tant par la technologie accessible, les compétences et

la formation de ceux qui les mettent en œuvre, leur relation aux réglementations de construction et d'urbanisme, leur mode de financement et les populations à qui ces constructions sont destinées. Pour cela, on a :

- des constructions industrialisées sur les standards des pays du nord: elles appartiennent aux grands groupes internationaux et se limitent aux bâtiments publics, aux infrastructures touristiques et hôtelières et aux bureaux
- des constructions par des entreprises artisanales : Ce sont des logements individuels ou de bâtiments de faible hauteur essentiellement
- des constructions informelles qui sont faites avec des matériaux peu chers et disponibles facilement. On les retrouve le plus souvent dans des bidonvilles.

La ventilation étant un moyen d'amélioration de confort en climat chaud et humide, les constructions sont faites dans des zones exposées aux vents dominants, où une faible mitoyenneté permet de favoriser la ventilation en laissant circuler l'air entre les bâtiments. De ce fait, en climat chaud et humide, le vitrage n'est pas forcément nécessaire, puisque sans vitrage, l'air peut mieux circuler et améliorer la ventilation. C'est le cas de la bande côtière du Bénin. L'utilisation des baies vitrées n'étant pas très courante dans les maisons construites par des entreprises artisanales, elles sont fortement utilisées dans les bâtiments publics ou appartenant aux grands groupes internationaux et dans les infrastructures hôtelières et touristiques. Elles permettent de protéger l'intérieur des intempéries, des insectes et des intrusions. La bande côtière du Bénin et en général les régions d'Afrique à climat chaud humide étant caractérisées d'une part, par un ensoleillement élevé, des températures élevées presque constantes et, d'autre part, par une hygrométrie toujours élevée, les habitudes visent à privilégier le simple vitrage par rapport au double et triple vitrage malgré la performance élevée du double vitrage par rapport au simple vitrage. Mais de nos jours avec la prolifération

des bâtiments entièrement vitrés de technologie moderne, on remarque que l'utilisation du double ou triple vitrage pour équiper certains bâtiments administratifs ou tertiaire en climat chaud et humide commence par prendre le pas. Est-ce là une transposition gratuite des habitudes des pays du nord vers le sud sans une étude approfondie ou le triple et le double vitrage sont aussi adéquats pour les régions chaudes et humides ?

III.4.1 Zone de climat chaud et sec

Les régions d'Afrique de climat chaud et sec étant caractérisées par :

- un ensoleillement important
- des températures élevées
- une différence de température entre le jour et la nuit relativement importante,
- une hygrométrie faible

Dans ce type de climat chaud et sec, on recherche à l'intérieur des bâtiments un microclimat confortable parce que découplé des conditions extérieures. Une forte mitoyenneté serait plus souhaitée, car le rapprochement des bâtiments permet de réduire les surfaces des parois exposées au soleil et de créer des zones d'ombrage. Le vitrage semble nécessaire ici pour limiter l'entrée de la chaleur et on utilise aussi bien le simple, le double que le triple vitrage.

En Egypte, quatre types de vitrage sont admis [6]. Ce sont :

1. Le simple vitrage (6.4mm) de référence G1
2. Le simple vitrage (6.4mm) réfléchissant de référence G2
3. Le double vitrage (3.2mm) de référence G3
4. Le double vitrage réfléchissant (6.4mm) de référence G4

Tableau 3.4 : Vitrages utilisés en Egypte

Désignation	Type	g	τ_v	U (W/m ² K)
G1 Clair 6.4mm	Simple	0.71	0.65	5.76
G2 Réfléchissant 6.4mm (couvert à 8% d'acier inoxydable)	Simple réfléchissant	0.18	0.06	5.36
G3 Clair 3.2mm – Transparent/Transparent (6.0mm air)	Double	0.66	0.59	3.71
G4 Clair réfléchissant 6.4mm – Transparent (couvert à 8% d'acier inoxydable) Transparent –(6mm d'air)	Double réfléchissant	0.13	0.05	2.66

Dans le but d'améliorer le confort thermique des bâtiments, le Code Egyptien de l'efficacité énergétique des bâtiments a défini des paramètres d'ombrage qui amélioreraient les conditions de confort thermique des bâtiment avec une consommation énergétique et financière minimales afin de réduire les émissions de CO₂. En fonction des différents microclimats du pays, ces paramètres définissent la fenestration des bâtiments. Parmi ces paramètres le ratio WWR entre les surfaces des ouvrants de la façade extérieure d'un bâtiment par rapport à la surface totale de cette façade joue un grand rôle. Quatre valeurs de WWR ont été alors admises [67].

Ce sont :

- < 10%
- 10-20%
- 20-30%
- > 30%

Ainsi pour chaque zone climatique, il a été associé à chaque type de vitrage utilisé, le coefficient WWR qui minimiserait la dépense énergétique pour un meilleur confort thermique des bâtiments. Selon Georges B. Hanna [6], ce paramètre a plus d'impact dans la région du Caire que dans la région d'Alexandrie. En faisant évoluer WWR de 0.05 à 0.4, l'énergie totale consommée augmente de 13% dans la région de Caire par rapport à 14% en Alexandrie.

En testant les types de vitrages souvent utilisés en Tunisie (tableau 3.5), Chiheb Bouden [68] a montré que les murs-rideaux de verre dans les bâtiments administratifs peuvent être moins énergivores que dans un mur en maçonnerie normale avec de petites fenêtres couvrant 20% de la surface totale de la paroi pour des choix bien appropriés de type de vitrage. Ainsi, par exemple pour les conditions hivernales, un double vitrage constitué d'un verre clair et d'un verre à faible émissivité rempli d'argon a la consommation d'énergie la plus faible parmi les types de vitrage souvent utilisés dans ce pays. En été, le double vitrage constitué d'un verre réfléchissant clair a aussi une faible consommation d'énergie.

Le double vitrage avec un verre clair et un verre réfléchissant a annuellement la plus faible consommation d'énergie. Il est suivi par un double vitrage constitué d'un verre clair et un d'un verre à faible émissivité G7 ou G6 (voir tableau 3.5)

Tableau 3.5 : Vitrages utilisés en Tunisie

Références	Description	τ_b	U(W/m ² K)
G1	Simple vitrage (clair)	0.87	5.8
G2	Simple vitrage, coloré (vert)	0.64	5.8
G3	Double vitrage(clair+air 4/12/4)	0.78	2.9
G4	Double vitrage (clair+air+coloré : 4/12/4)	0.54	2.9
G5	Double vitrage (clair+air verre réfléchissant)	0.12	2.3
G6	Double vitrage(clair+air+verre à faible émissivité 4/12/4)	0.64	1.7
G7	Double vitrage (clair+argon+verre à faible émissivité 4/16/4)	0.64	1.1

III.4.2 Zones chaudes et humide (Cas de la bande côtière du Bénin) : Caractérisation des vitrages utilisés dans la bande côtière du Bénin

Comme nous l'avons signalé plus haut, les vitrages les plus utilisés au Bénin, sont de type simple. Le Bénin, ne disposant d'aucun centre de contrôle des verres utilisés dans le bâtiment, les caractéristiques techniques des vitrages utilisés au Bénin sont jusque-là restées inconnues. Cette partie de nos travaux va nous permettre de solutionner ce problème par une détermination des caractéristiques des vitrages couramment utilisés au Bénin.

Des vitres ramenés du Bénin, nous en avons découpé 6 échantillons (5cmX5cm) de verre de nature différente qui ont été pourvus d'une étiquette d'identification univoque. Les types de verre caractérisés sont les suivants :

- Float bleuté (4mm) portant l'étiquette numérotée (1)
- Bronze (4mm) portant l'étiquette numérotée (3)

- VAB float fumé portant l'étiquette (4)
- Clair (4mm) portant l'étiquette (5)
- Clair float (3mm) portant l'étiquette (6)
- Clair float (5mm) portant l'étiquette (7)

Cette caractérisation fait appel à des mesures qui ont été faites au laboratoire du CSTC de Belgique.

III.4.2.1 Matériels et méthodes

Pour la détermination des caractéristiques lumineuses et énergétiques de ces verres, les propriétés spectrales de transmission et réflexion ont été mesurées dans le domaine du rayonnement solaire (longueurs d'onde de 280 nm à 2500 nm).

A partir de ces mesures, les caractéristiques suivantes ont été calculées :

- Transmission énergétique et lumineuse
- Transmission dans l'ultraviolet (UV-A et UV-B)
- Réflexion énergétique et lumineuse
- Indice de rendu des couleurs (en transmission)

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre de marque "Perkin-Elmer Lambda 900 UV – VIS – NIR". Il s'agit d'un spectrophotomètre commercial UV-VIS-NIR (ultraviolet-visible-near infrared) à double faisceau et double monochromateur (Numéro de série : 101N9012992).

Le spectrophotomètre est équipé d'une sphère intégratrice de 150mm de diamètre de marque Perkin-Elmer PELA1000.

L'éprouvette de référence, utilisée pour les mesures en réflexion, est un miroir avec un coating aluminium qui a été étalonné à partir d'une éprouvette étalon primaire de même type *(miroir portant la référence BT02) Cet étalon primaire

a été lui-même étalonné par le laboratoire de métrologie NPL (National Physical Laboratory, UK).

Un spectrophotomètre UV/VIS/NIR se compose des parties suivantes :

- Une source de lumière (spectre de rayonnement électromagnétique de longueurs d'onde comprises entre 185 et 3300nm.
- Un monochromateur qui filtre la lumière pour ne laisser passer qu'une gamme très étroite de longueurs d'ondes (lumière monochromatique) et qui permet de faire varier la plage de longueur d'ondes qu'il laisse passer (gamme de 0.005nm à 10nm selon la qualité des appareils). Le « chopper » permet de diriger le faisceau alternativement vers un matériau de référence et vers l'échantillon à mesurer afin de comparer les 2 signaux.
- Un compartiment de mesure où l'échantillon peut être placé.
- Un capteur pour mesurer le signal lumineux transmis successivement via la référence et via l'échantillon pour chaque longueur d'onde

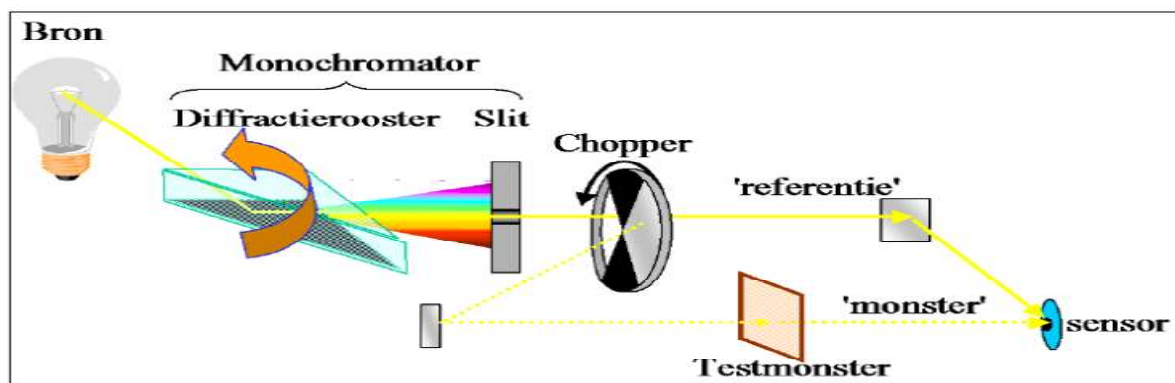


Figure 3.13 : Schéma d'un spectrophotomètre

Les mesures ont été faites sous angle d'incidence normal. Selon la nature du matériau, après avoir atteint la surface de l'échantillon, le rayonnement incident peut être réfléchi de manière spéculaire ou diffuse. Une autre partie de ce rayonnement peut également traverser l'échantillon et être transmise de

manière directe ou diffuse (voir figure 3.14). La part relative des différentes composantes varie selon l'angle d'incidence par rapport à la normale. Afin de pouvoir comparer les résultats de mesure de différents échantillons entre eux, on place l'échantillon de manière à ce que le rayonnement incident atteigne la surface de l'échantillon avec un angle d'incidence proche de la normale.

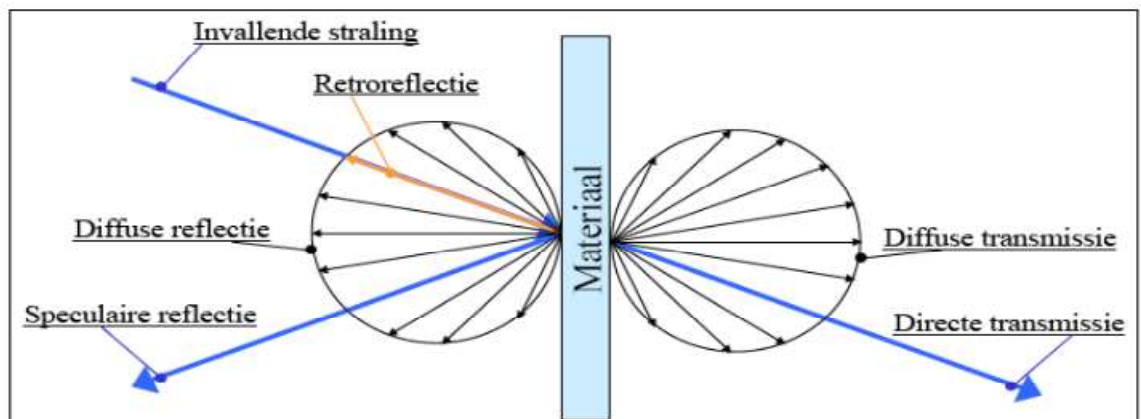


Figure 3.14 : Mesure sous l'angle d'incidence normale

Pour la plupart des mesures sur verre et sur protection solaires, on utilise une sphère intégratrice. Le but de la sphère intégratrice est de pouvoir mesurer de manière distincte les composantes directes et diffuses de la transmission et de la réflexion.

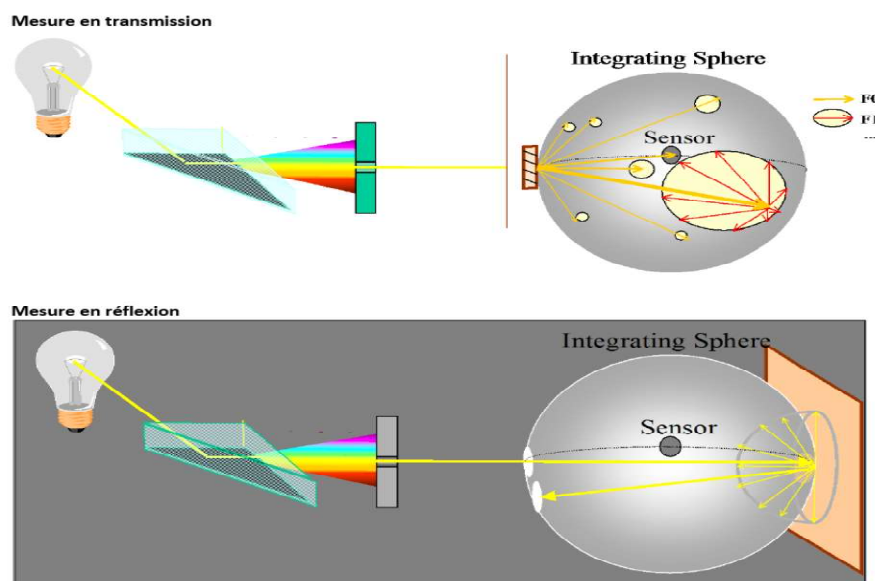


Figure 3.15 : Utilisation d'une sphère intégratrice

III.4.2.2 Résultat des mesures

Les propriétés énergétiques et lumineuses ont été calculées à partir de la mesure des valeurs spectrales de l'échantillon selon la norme NBN EN 410.

Toutes les mesures ont été effectuées sous angle d'incidence normale par rapport à l'échantillon.

Les valeurs suivantes sont données :

τ_v : transmission lumineuse

τ_e : transmission énergétique

τ_{UV} : transmission dans le domaine UV

ρ_v : réflexion lumineuse

ρ_e : réflexion énergétique

R_a : indice de rendu des couleurs (en transmission)

Les mesures de transmission ont été réalisées avec la source lumineuse orientée du côté de l'échantillon portant l'étiquette d'identification.

Les mesures de réflexion ont été effectuées pour les deux côtés de chaque échantillon :

- ρ_e et ρ_v indiquent les réflexions du côté "recto" de l'échantillon qui est pourvu d'une étiquette d'identification
- ρ'_e et ρ'_v indiquent les réflexions du côté "verso" de l'échantillon qui n'est pas pourvu d'une étiquette d'identification

La procédure de mesure suivante a été appliquée :

- 10 mesures ont été réalisées en différentes positions de l'échantillon
- La valeur moyenne de ces a été déterminée et les propriétés lumineuses et énergétiques ont été calculées.

Les caractéristiques mesurées sont indiquées pour chaque type de verre dans le tableau suivant.

Tableau 3.6 : Valeurs mesurées des propriétés lumineuses et énergétiques

Type	Energie			Lumière			UV	R_a
	τ_e (%)	ρ_e (%)	$\rho_{e'}$	τ_v (%)	ρ_v (%)	$\rho_{v'}$	τ_{UV} (%)	
Float Bleuté 4mm (1)	19.7	20.7	7.7	27.3	28.8	10.1	5.6	84
Bronze 4mm (3)	56.0	6.0	6.1	57.0	5.9	6.1	21.4	94
VAB Float fumé (4)	31.0	11.8	27.6	24.3	13.7	33.1	6.8	86
Clair 4mm (5)	86.6	8.5	8.4	90.2	8.7	8.7	70.2	99
Clair Float 3mm (6)	87.9	8.6	8.6	90.7	8.7	8.7	74.4	100
Clair Float 5mm (7)	80.9	8.2	8.1	88.4	8.7	8.6	58.5	99

Au regard du tableau 3.6, on constate que les verres clairs ont une transmission énergétique plus élevée que celle des verres colorés. En revanche, les coefficients de réflexion sont plus élevés avec les verres colorés. Cette teinte probablement obtenue par l'ajout d'une couche d'oxyde métallique est à l'origine de cette baisse de transmission énergétique pour les verres colorés et une augmentation de la capacité de réflexion. Les transmissions énergétiques mesurées sur chaque échantillon de verre étant supérieures aux moitiés respectives des transmissions lumineuses, il en vient que les caractéristiques énergétiques et lumineuses des verres testés sont admissibles.

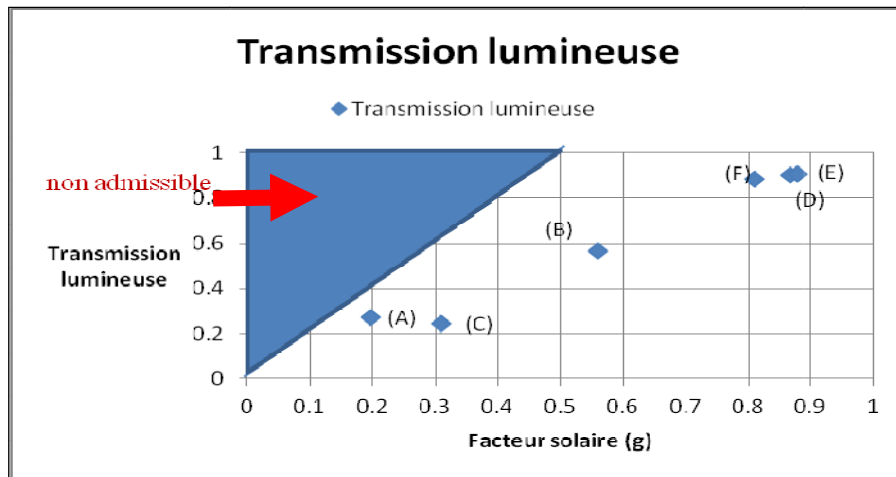


Figure 3-16 : Transmission lumineuse en fonction du facteur solaire

En effet, le rayonnement visible formant la moitié du spectre solaire, la transmission énergétique de chaque verre testé ne peut être inférieure à la moitié de la transmission lumineuse. Ceci se remarque à la figure 3-16 où les points A, B, C, D, E et F représentant respectivement les verres float bleuté (4mm), bronze 4mm, VAB float fumé, clair 4mm, clair float 3mm et clair float 5mm ne sont pas dans le domaine non admissible représenté en bleu sur la figure 3-16

III.5 Conclusion

Les verres utilisés dans le bâtiment dans la bande côtière du Bénin, sont du simple vitrage et respectent les caractéristiques techniques admises par la norme. Cependant, il se pose la question de leur performance énergétique dans cette région du Bénin ? Le prochain chapitre suivant s'adresse à cette question.

CHAPITRE 4. OPTIMISATION DU CHOIX DU VITRAGE

IV.1 Introduction

La plupart des vitrages utilisés dans les bâtiments au Bénin est claire ou teintée et est du simple vitrage, souvent importé de l'Orient et de l'Europe. Le Bénin, ne disposant pas de structure de contrôle et de caractérisation de verres pour le vitrage des bâtiments, il se pose la question de leur adéquation aux conditions climatiques du pays. Dès lors, l'utilisation abusive et anarchique de ces vitrages crée à l'intérieur des immeubles, un inconfort de surchauffe. Pour pallier à ce problème et améliorer les conditions de confort, on a alors recours à l'utilisation d'une climatisation active ou d'un système de ventilation mécanisée entraînant ainsi une dépense souvent excessive d'énergie. Ceci peut alors compromettre les efforts fournis par le gouvernement du Bénin à vulgariser, l'accès à l'énergie électrique, le Bénin n'ayant pas atteint son autonomie énergétique.

Avec les caractéristiques optiques et thermiques des verres utilisés au Bénin, nous avons procédé à une simulation TRNSYS pour en déduire l'impact des vitrages réalisés à l'aide de ces verres sur le confort thermique du bâtiment au Bénin. Pour cela nous avons :

- procédé à l'évaluation du comportement thermique du bâtiment, objet de nos travaux à l'aide du logiciel TRNSYS et, apprécié la sensation thermique des occupants sans apport d'un système de climatisation. Cette étude a été faite en faisant varier la nature du vitrage utilisé, afin de pouvoir tester les vitres utilisées au Bénin, et en choisir celle qui permette de maintenir une ambiance intérieure respectant les conditions hygro – thermiques confortables dans la bande côtière du Bénin ;
- procédé à l'amélioration du confort thermique à l'intérieur du bâtiment test équipé du vitrage adéquat, tout en simulant le comportement thermique du bâtiment avec un rafraîchissement naturel obtenu par les protections solaires et la ventilation naturelle.

IV.2 Impact des vitrages utilisés au Bénin sur le confort thermique du bâtiment test

IV.2.1 Zones thermiques du bâtiment

administration financière. Il est composé d'un rez de chaussée et d'un étage qui sont deux ambiances bien séparées par la dalle. De ce fait, nous avons divisé l'immeuble en deux zones thermiques. Le rez de chaussée est la zone thermique 1 tandis que l'étage, la zone thermique 2.

IV.2.2 Simulations

Pour les différentes simulations réalisées, nous avons procédé à l'évaluation du comportement thermique du bâtiment, objet de nos travaux à l'aide du logiciel TRNSYS et, apprécié la sensation thermique des occupants sans apport d'un système de climatisation active. Cette étude est faite en faisant varier la nature du vitrage utilisé afin de pouvoir tester les vitres utilisées au Bénin et en choisir celle qui permet de maintenir une ambiance intérieure respectant les conditions hygrothermiques confortables dans la bande côtière du Bénin.

Les simulations ont été faites pour chaque type de vitrage durant le mois de Mars, mois réputé être le plus chaud de l'année. Pour cela on a procédé à :

- la simulation sur un même graphique de l'évolution des humidités relatives (extérieur, au rez et à l'étage) ;
- la simulation sur un même graphique de l'évolution des températures (externe, au rez et à l'étage) ;
- l'étude de l'évolution du PMV en fonction de la température ambiante et de l'humidité relative aussi bien à l'étage qu'au rez de chaussée ;
- la détermination du pourcentage du temps d'inconfort par rapport à la période d'occupation du bâtiment;
- l'optimisation du choix du vitrage pour ce type de climat ;

Les calculs du PMV ont été faites avec le modèle de FANGER adapté à la bande côtière du Bénin (voir chapitre 2).

Le bâtiment étant celui d'une administration financière, la période où il est occupé est comprise entre 8h et 18 heures. Il en vient que dans une journée, l'immeuble est occupé pendant 10 heures, soit 310 heures durant le mois de Mars.

Les analyses et interprétations étant les mêmes pour les vitrages testés, nous n'avons présenté les résultats obtenus que pour le vitrage clair float 3mm. On trouvera en annexe, les simulations concernant les autres types de vitrage testés.

IV.2.2.1 Utilisation du modèle de confort validé :

A partir des études réalisées au chapitre 2, le modèle de FANGER adapté aux conditions climatiques de la bande côtière du Bénin s'écrit sous la forme suivante :

$$PMV_{adapté} = (0.303 \exp(-0.036.M) + 0.028) [M - 3.0510^{-3}(5733 - 6,99.M - p_a) - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5}M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96.10^{-8}.f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - (0.15t_a - 0.046RH) \quad (4.1)$$

En étudiant l'évolution des paramètres physiques que sont la température et l'humidité relative qui influencent plus le confort thermique, on obtient pour le vitrage clair float 3mm les résultats suivants :

- **Vitrage clair float 3mm**

Les courbes des figures 4-1 et 4-2 illustrent les résultats de nos simulations

a) Evolution des hygrométries

L'humidité relative à l'étage est supérieure à celle au rez de chaussée (voir figures 4-1 et les figures 2 des annexes 2, 3 et 4 et les figures 1 et 2 de l'annexe 1).

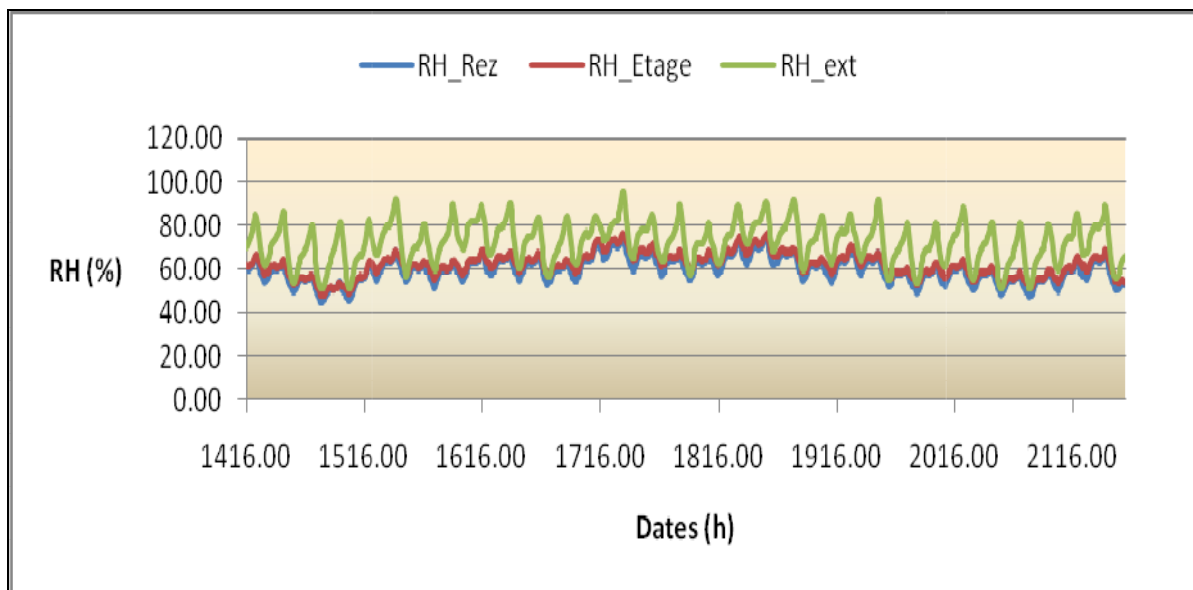


Figure 4-1 : Evolution des hygrométries

En effet la seule source d'apport en eau dans les ambiances considérées est due à la présence d'individus. Au rez de chaussée, nous avons estimé 23 personnes présentes dans l'ambiance contre 11 personnes à l'étage. L'apport en eau par ces personnes est relativement faible par rapport à l'eau contenue dans l'air du fait de la situation géographique de cette région du Bénin (humidité relative trop élevée). La température augmentant au rez de chaussée et à l'étage par rapport à la température extérieure, du fait du vitrage, l'air ambiant s'échauffe et perd une partie de son humidité relative. L'air ambiant étant moins chauffé à l'étage qu'au rez de chaussée (figure 4-2) et les figures 1 des annexes 2, 3 et 4 et les figures 1 et 2 de l'annexe 1, il perd moins de son humidité à l'étage qu'au rez de chaussée. Par conséquent l'humidité relative à l'étage est plus élevée que celle au rez.

b) Evolution des températures

La température ambiante au rez de chaussée est supérieure à celle de l'étage qui à son tour est supérieure à celle de l'extérieure (voir figures (4-2) et les figures 1 des annexes 2, 3 et 4 et les figures 1 et 2 de l'annexe 1).

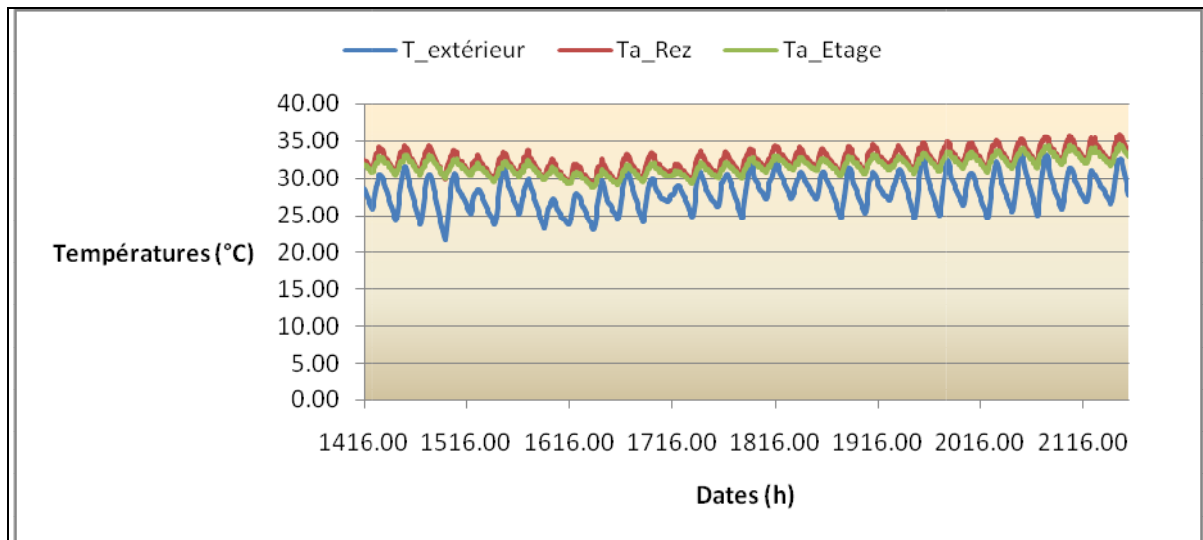


Figure 4-2: Evolution des températures

Ceci s'explique par l'action conjuguée de l'importance de l'effet dû au vitrage au rez de chaussée par le rayonnement solaire et celui de l'énergie réfléchiée par le sol et les bâtiments aux alentours, la température à l'étage étant rafraichie par le déplacement de l'air en hauteur.

En effet, le flux unidimensionnel dans une paroi plane en régime permanent selon la loi de Fourier, nous permet d'écrire les relations suivantes :

$$\phi = -\lambda S \frac{d\theta}{dx} \quad (4.2)$$

x : la distance séparant la face 1 de la face 2

θ_i : la température, i étant le numéro de la paroi

S : la surface de la parois

λ : la conductivité thermique du milieu séparant les différentes parois

La distance x séparant la face 1 de la face 2 n'étant rien d'autre que l'épaisseur de la paroi, l'expression du flux thermique sera donnée par :

$$\phi = \lambda \frac{S(\theta_1 - \theta_2)}{e} \quad (4.3)$$

e étant l'épaisseur de la parois

La température au rez de chaussée et à l'étage, étant fonction du flux d'énergie sur les parois vitrées qui à son tour dépend de la surface, il s'en suit qu'elle soit

plus importante au rez qu'à l'étage, puisque la surface vitrée est de 8 m² à la façade sud au rez de chaussée et de 2.04m² à l'étage.

c) Evolution du PMV

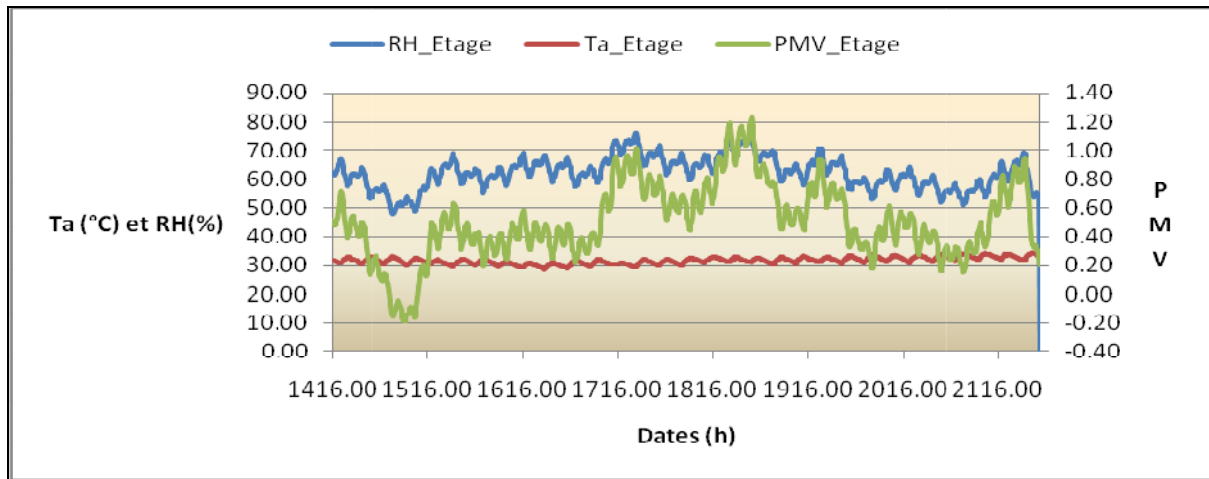


Figure 4-3 : PMV en fonction de Ta et RH (étage)

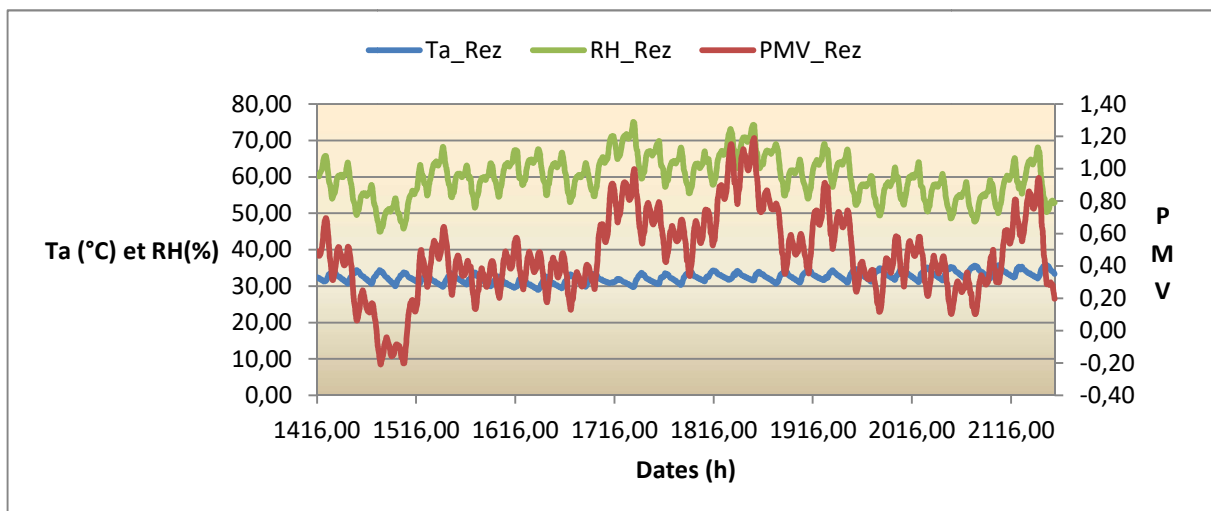


Figure 4-4 : PMV en fonction de Ta et RH (Rez de chaussée)

Le PMV, évolue dans le temps de la même manière que l'humidité relative, pendant que la température reste presque constante, ce qui est en fait une caractéristique du climat des régions tropicales et humides. **La température étant constante** (figures 4-3 ; 4-4) et les figures 3 et 4 des annexes 2, 3 et 4 et les figures 1 et 2 de l'annexe, **l'humidité relative devient le paramètre discriminant dont dépend alors le PMV**. Ceci a été remarqué au chapitre 2 de ces travaux.

Les résultats obtenus à partir des tests des autres vitrages sont consignés en annexes 1, 2 et 3. Ils sont identiques à ceux obtenus avec le vitrage clair float 3 mm, mais avec des taux d'inconfort différents.

Que ce soit au rez de chaussée ou à l'étage, on note que tous les vitrages ne présentent que de l'inconfort de surchauffe avec un renouvellement d'air de 0.6 vol/h (tableau 4-1). Aucun de ces vitrages ne présente d'inconfort de fraîcheur. Cet inconfort de surchauffe est plus accentué à l'étage qu'au rez de chaussée. Ceci est bien prévisible puisque l'humidité est plus importante à l'étage qu'au rez.

Tableau 4-1: Récapitulatif des taux de surchauffe

Type de vitrage	Zone thermique	Durée de surchauffe (heures)	Taux de surchauffe (%)	Durée d'inconfort de fraîcheur (heure)	Taux d'inconfort de fraîcheur (%)
Vitrage float clair 3mm	rez	108	34.84	0	0
	étage	128	41.29	0	0
Vitrage float clair 4mm	rez	108	34.84	0	0
	étage	128	41.29	0	0
Vitrage float 5mm	rez	110	35.4	0	0
	étage	130	41.9	0	0
Vitrage Bronze 4mm	rez	123	39.67	0	0
	étage	150	48.38	0	0
Vitrage VAB float fumé	rez	141	45.48	0	0
	étage	181	58.38	0	0
Vitrage float bleuté 4mm	rez	160	51.60	0	0
	étage	198	63.54	0	0

IV.2.2.2 Optimisation du choix du vitrage

Que ce soit au rez de chaussée ou à l'étage, on note que tous ces vitrages ne présentent que de surchauffe avec le renouvellement d'air de 0.6/h, la norme admise pour les tester tout en mettant en évidence les paramètres thermiques et optiques de chaque vitrage. A partir des résultats des différentes simulations, on pourra faire la synthèse du tableau 4-2:

Tableau 4-2 : Synthèse

Types de verre	Taux d'inconfort de surchauffe(%)		Transmission Energétique (%)	Transmission Lumineuse (%)
	Rez	Etage		
Float bleuté 4mm	51.6	63.54	19.7	27.3
VAB float fumé	45.48	58.38	31	24.3
Bronze 4mm	39.67	48.38	56	57
Clair float 5mm	35.4	41.9	80.9	88.4
Clair 4mm	34.84	41.29	86.6	90.2
Clair float 3mm	34.84	41.29	87.9	90.7

En considérant comme contrainte d'optimisation, le taux d'inconfort de surchauffe, nous constatons que pour un renouvellement d'air de 0.6 vol/h, aucun de ces verres ne garantit les conditions hygrothermiques d'une ambiance confortable, le taux d'inconfort de surchauffe étant pour tous les échantillons de verre testés, supérieur à 5%. Cependant, plus la transmission énergétique est élevée, plus le taux d'inconfort de surchauffe diminue. Par conséquent, **les verres "clair 4mm et float 3mm" (transmission énergétique plus élevée) admettant un même taux d'inconfort de surchauffe relativement faible par rapport aux autres, du point de vue thermique, seraient plus indiqués pour le vitrage dans la bande côtière du Bénin.** Ceci paraît paradoxal, mais s'explique par le fait que le l'humidité relative soit le facteur discriminant dont dépend le confort thermique dans cette région.

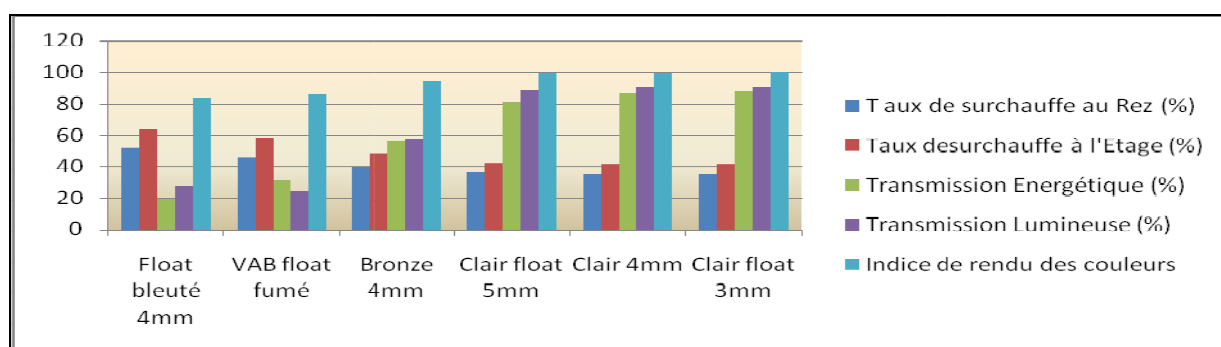


Figure 4-5 : taux de surchauffe en fonction des caractéristiques thermiques et optiques des différents verres

Une étude comparative de l'évolution dynamique du PMV nous permet d'obtenir les graphes suivants :

En désignant par :

Fb4mm= float bleuté 4mm

VAB float fumé= VABFF

Br= Bonze 4mm

Clf5mm

Clair = clair 4mm =clair float 3mm

Etage

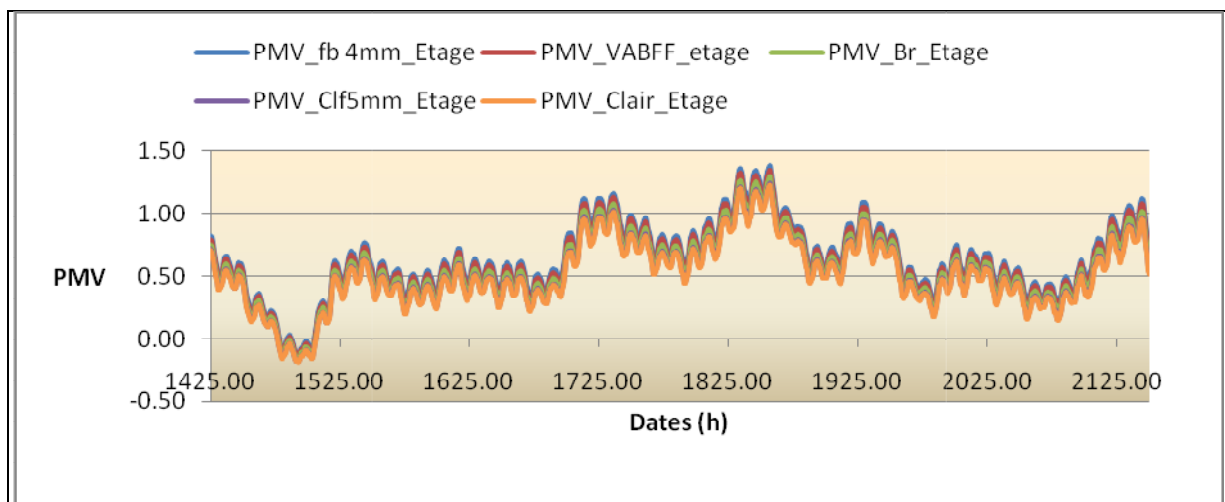


Figure 4-6 : Comparaison des PMV (différents vitrages) à l'étage

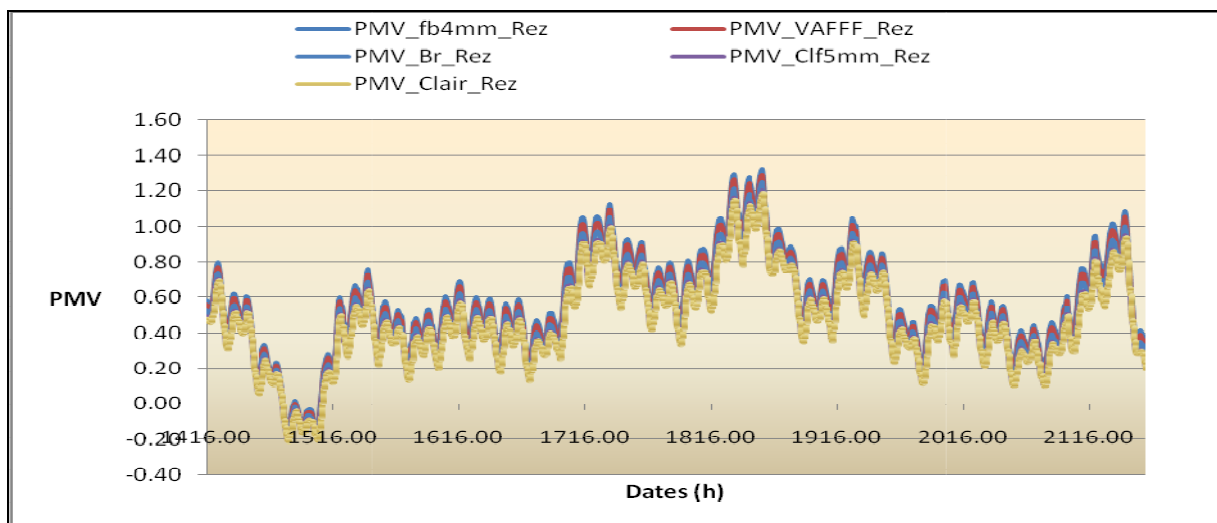


Figure 4-7 : Comparaison des PMV(différents vitrages) au Rez

A partir des figures 4-6 et 4-7, on remarque que les PMV_clair_etage et PMV clair_Rez (PMV lorsque le bâtiment est équipé du vitrage clair float 3mm ou clair 4mm) est inférieur aux autres PMV (lorsque le bâtiment est équipé des autres types de vitrage). Par conséquent les vitrages clair 4mm et clair float 3mm créent le meilleur confort thermique des six échantillons de verre testés, donc confèrent aux différentes ambiances, le plus bas taux d'humidité relative à cause de leur coefficient de transmission énergétique plus élevée.

Nous retenons que parmi les verres testés, les vitrages clairs float 3mm et clair 4mm sont ceux qui permettent de maintenir une ambiance intérieure respectant les conditions hygrothermiques confortables dans la bande côtière du Bénin.

Pour choisir entre les deux verres retenus, il faut tenir compte de la transmission dans le domaine UV, la transmission lumineuse et l'indice de rendu des couleurs.

Tableau 4-3: Optimisation du choix du vitrage

Type	Energy			Ligth			UV	R_a
	$\tau_e(\%)$	$\rho_e(\%)$	$\rho_{e'}(\%)$	$\tau_v(\%)$	$\rho_v(\%)$	$\rho_{v'}(\%)$	$\tau_{uv}(\%)$	
Clair 4mm	86.6	8.5	8.4	90.2	8.7	8.7	70.2	99
Clair Float 3mm	87.9	8.6	8.6	90.7	8.7	8.7	74.4	100

Selon le tableau 4-3, les coefficients de transmission lumineux et l'indice de rendu des couleurs sont respectivement de 90.7% et 100% pour le verre clair float 3mm et respectivement 90.2% et 99% pour le verre clair 4mm. On pourrait alors en déduire que, pour la bande côtière du Bénin, le vitrage simple clair float 3mm garantit le mieux les conditions hygrothermiques d'ambiance. Cependant, du fait que l'épaisseur du verre clair float 3mm s est faible, il peut être sujet à une fissure ou à une brisure au moindre choc. Son utilisation, nécessite alors une tenue à avoir par rapport à ce verre.

En utilisant le verre clair 4mm, on réduit ce facteur de facilité de fissure et de brisure.

IV.2.3 Conclusions 1

De tout ce qui précède, on pourra retenir

- Plus élevée sera la transmission énergétique du vitrage, mieux les conditions hygrothermiques d'ambiance seront améliorées dans cette région.
- Des six échantillons de verres testés, le verre simple float clair 4mm garantit mieux les conditions hygrothermiques d'ambiance.

IV.3 Amélioration de la performance du vitrage dans les bâtiments administratifs dans la bande côtière Bénin

Pour améliorer les performances énergétique du vitrage optimal choisi, nous avons utilisés les stratégies suivantes :

- Système d'ombrage
- Le "night cooling"
- La ventilation naturelle
- La combinaison ombrage et ventilation
- La combinaison "night cooling", ventilation et ombrage

Les paramètres de simulation sont :

Vitesse de l'air ambiant $v=0\text{m/s}$

Renouvellement d'air : 0.9/h

Habillement : 0.6 clo

IV.3.1 Intégration de système d'ombrage

Dans tout ce qui va suivre, les acronymes "O", "SO", "DVSOS_SCH" désignent respectivement "avec ombrage", "sans ombrage", "double vitrage en "night cooling"".

IV.3.1.1 Vitrage simple

Pour améliorer le confort thermique de l'immeuble, objet de notre étude, nous avons dans un premier temps utilisé un ombrage externe sur les parois vitrées.

En effet, deux façades de l'immeuble sont exposées au soleil. Les façades Sud et Nord. En utilisant un ombrage sur les parois vitrées de l'immeuble TEST, on réduit ainsi l'impact du rayonnement direct. Les différentes simulations et l'évaluation du taux d'inconfort de surchauffe nous permettent d'obtenir les résultats suivants

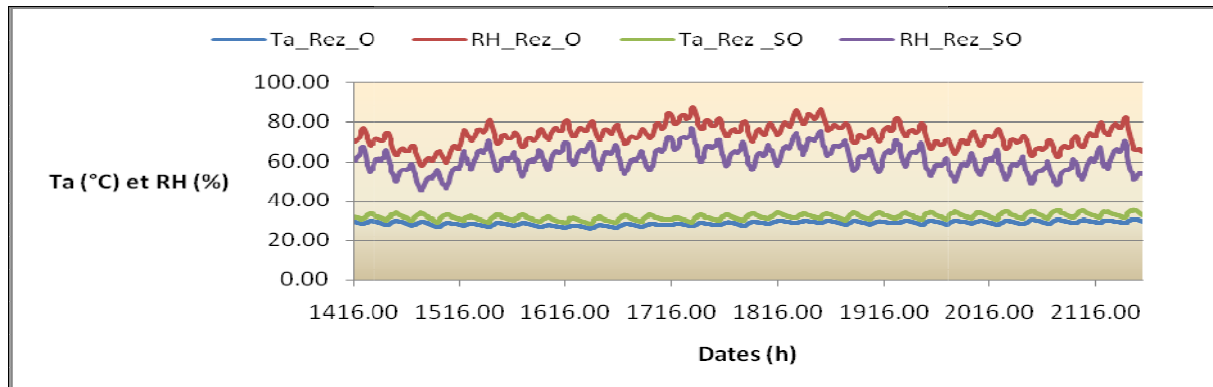


Figure 4-8 : Comparaison températures et humidités de l'air ambiant au Rez de chaussée

L'ombrage fait baisser la température à l'intérieur du bâtiment (figures 5 et 6). La pression saturante de la vapeur d'eau étant de ce fait diminuée, l'humidité relative augmentera à l'intérieur de l'immeuble (figures 4-8 et 4-9).

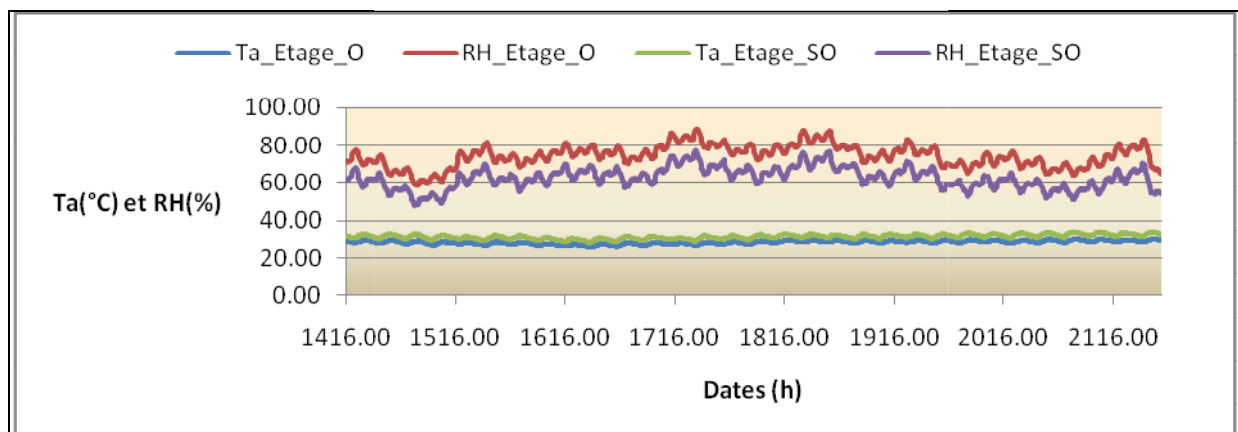


Figure 4-9: Comparaison des températures et humidités relatives à l'étage

En appelant η le "shading factor", soit le facteur d'ombrage, le cas le plus défavorable d'accroissement de l'humidité relative se produirait lorsque que le rayonnement solaire est intercepté par l'ombrage sur toutes la surface des

parois vitrées. Dans ce cas, $\eta = 1$. Il correspond à la limite supérieure d'abaissement de la température à l'intérieur de l'immeuble par l'intégration du système d'ombrage.

L'humidité comme nous l'avons remarquée dans nos précédents travaux, étant le paramètre discriminant dont dépend le confort thermique des bâtiments administratifs dans la bande côtière du Bénin, soit le PMV, une augmentation de l'hygrométrie du fait de l'ombrage a détérioré le confort thermique, puisque le PMV avec ombrage est supérieur au PMV sans ombrage (figures 4-10 et 4-11).

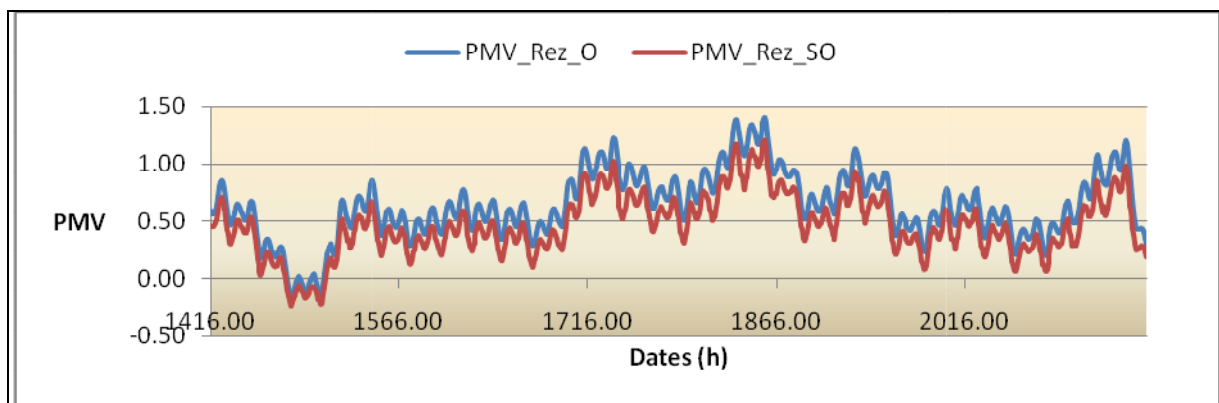


Figure 4-10 : Comparaison des PMV au rez de chaussée

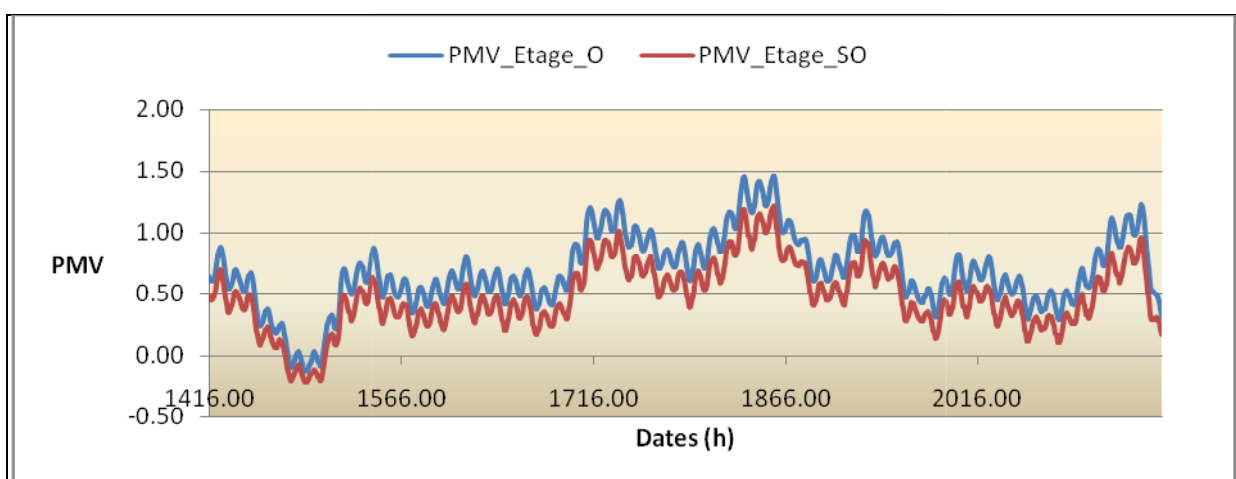


Figure 4-11: comparaison des PMV à l'étage

Avec un taux de renouvellement d'air de 0.9/ h, le taux d'inconfort de surchauffe dans la situation ombragée est supérieure à celle à la situation sans ombrage (voir tableau 5). Le taux d'inconfort de fraîcheur étant nulle dans la situation sans ombrage, l'augmentation du PMV dans la situation avec ombrage, ne peut que faire accroître le taux d'inconfort de chaleur, puisque les instants inconfortables sans ombrage renforcent leur état d'inconfort, tandis que certains qui ne le sont pas le deviennent lorsque l'immeuble est ombragé.

Tableau 4-4: Taux d'inconfort pour le vitrage clair float 4mm

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Durée de surchauffe (0.9/h AVEC OMBRAGE)		Durée de surchauffe (0.9/h SANS OMBRAGE)	
		heures	taux (%)	heures	taux (%)
310	Rez	190	61.29	107	34.51
	Etage	229	73.8	116	37.41

Conclusion partielle 1

Contrairement au pays du Nord où l'ombrage reste un moyen d'amélioration du confort, dans la bande côtière du Bénin, l'ombrage seul, sans combinaison avec une autre stratégie accentuerait l'inconfort thermique des immeubles administratifs dans la bande côtière du Bénin. Evidemment, plus il y a d'ombrage, l'air n'est plus chauffé, l'humidité de l'air ne diminue plus, ce qui augmente l'inconfort dans l'immeuble.

A partir de cette étude, on peut déduire que diminuer simplement la surface des baies vitrées, n'améliorerait pas non plus le confort thermique du bâtiment test puisque cette pratique ne pourra pas permettre d'assécher l'air ambiant pour diminuer l'hygrométrie à l'intérieur de l'immeuble. A notre humble avis, il semble que la méthode à explorer serait celles qui feraient intervenir la ventilation, comme l'ont d'ailleurs remarqué GIVONI [76] et Norbert Cossi AWANOU, en climat chaud et humide.

IV.3.1.2 Double vitrage

Nous avons testé l'utilisation du double vitrage dans cette région du Bénin pour apprécier ici la prise en compte de la performance énergétique du bâtiment test, puisqu'il est actuellement équipé d'un double vitrage comme le stipulent les plans qui nous ont été fournis. Pour cela, nous avons testé 15 différents doubles vitrages ayant des caractéristiques thermiques différents. Nous sommes intéressés plus aux doubles vitrages de 16mm d'épaisseur d'air ou de gaz entre les verres, puisque au-delà de 16mm, l'isolation du vitrage ne diminue plus [77].

- Test avec différents double vitrage

Nous avons réalisé des simulations avec d'autres types de double vitrage issus des différentes bibliothèques de TRNSYS et avons calculé le taux d'inconfort en situation sans ombrage.

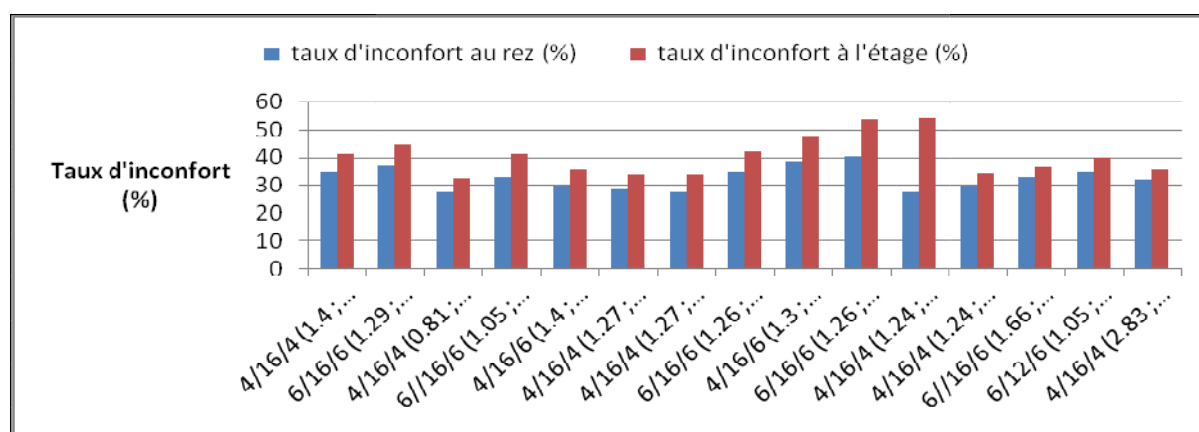


Figure 4-12 : Test des doubles vitrages

Ce test fait avec 15 différents double vitrage, nous a permis de déterminer le double vitrage le plus performant. Ici nous constatons que c'est le double vitrage du type (4/16/4) avec pour coefficient thermique (U, g) le couple (0.81 ; 0.632) qui paraît être plus performant.

Nous avons alors retenu de poursuivre les test de stratégie d'amélioration du confort thermique du bâtiment test, objet de nos recherches en nous basant sur les deux doubles vitrages que sont le 4/16/4 (0.81 W/K.m^2 ; 0.632) et le 6/12/6 (1.66 W/K.m^2 ; 0.48) qui actuellement équipe l'immeuble.

- **Double vitrage 6/12/6 équipant l'immeuble**

Le bâtiment étant équipé d'un double vitrage 6/12/6, nous avons intégré ce type de vitrage dans TRNSYS et avons repris les mêmes expérimentations que précédemment. Les paramètres de ce vitrage calculé à l'aide du logiciel Window 6.1, on a obtenu les caractéristiques thermiques suivants : $U=1.66\text{W}/:\text{m}^2\text{K}$; $g=48\%$; $T\text{-vis}=76.6\%$

Les différentes simulations nous permettent d'obtenir les résultats suivants :

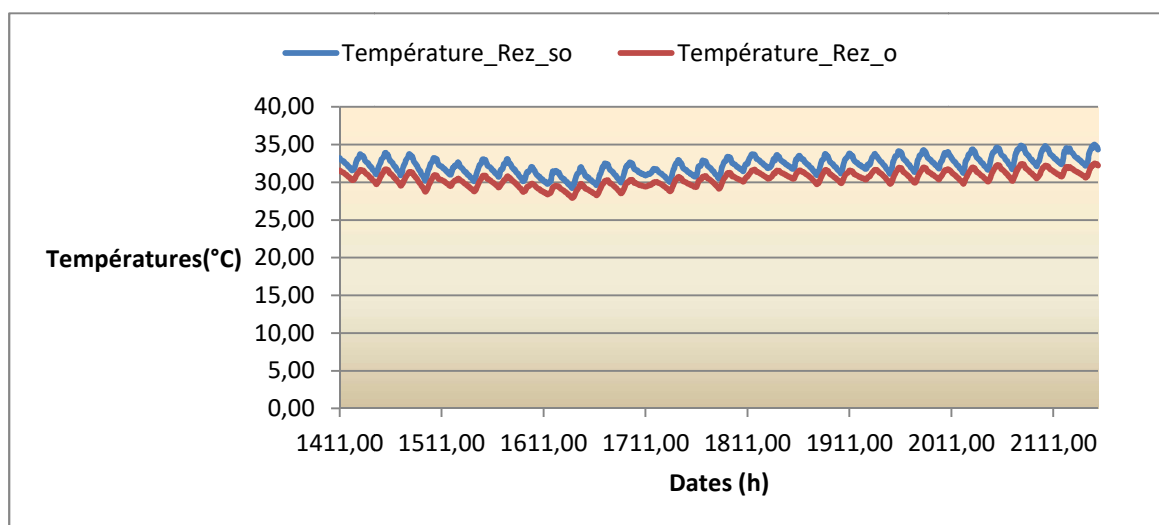


Figure 4-13: Comparaison des températures au rez

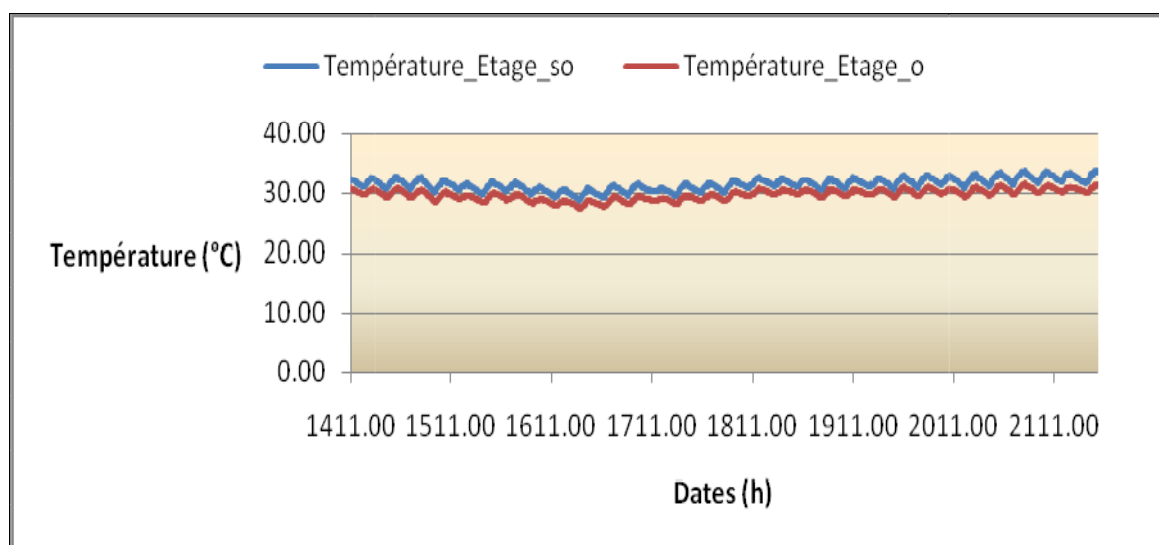


Figure 4-14 : Comparaison des températures à l'étage

Que ce soit à l'étage ou au Rez, les figures 4-13 et 4-14 montrent que les températures avec ombrages sont plus basses que celles sans ombrage. Evidement comme dans le cas du simple vitrage, l'ombrage représente ici un obstacle pour les rayonnements directs surtout sur la paroi orientée sud, ce qui fait baisser alors les températures internes. Par conséquent l'hygrométrie augmente lorsqu'il y a ombrage (figures 4-15et 4-16), ce qui détériore le confort thermique de l'ambiance c'est-à-dire le PMV (voir figures 4-17 et 4-18).

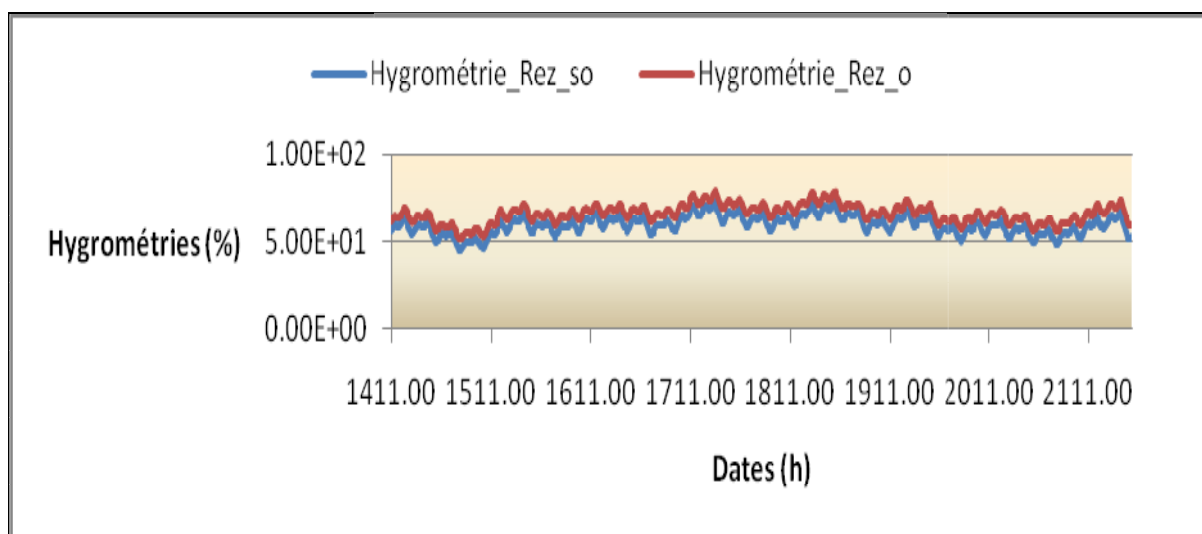


Figure 4-15 : Comparaison des humidités relatives au Rez

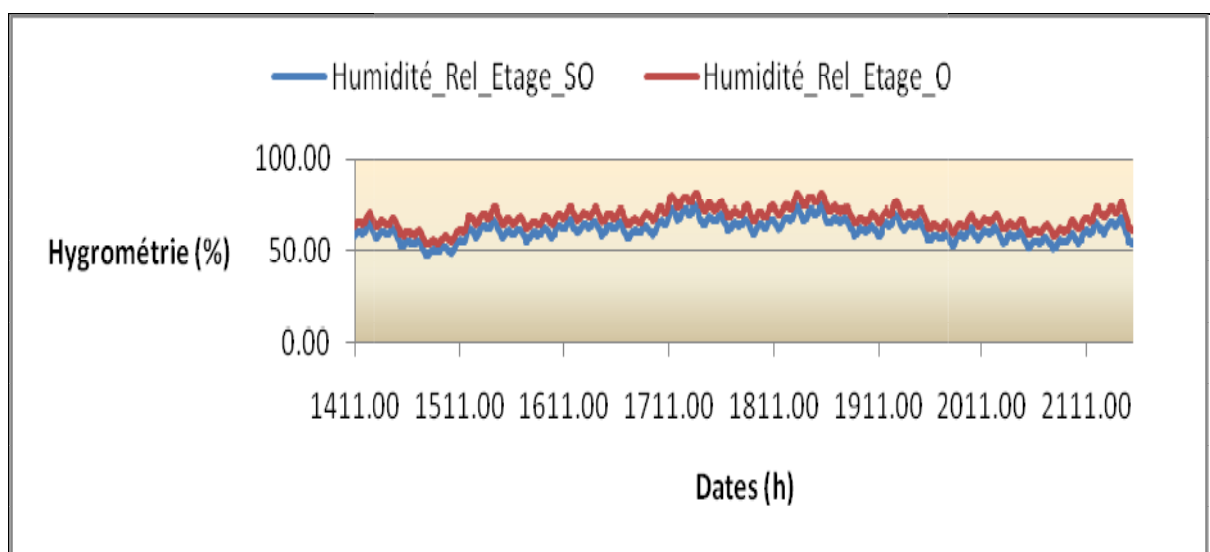


Figure 4-16: Comparaison des humidités à l'étage

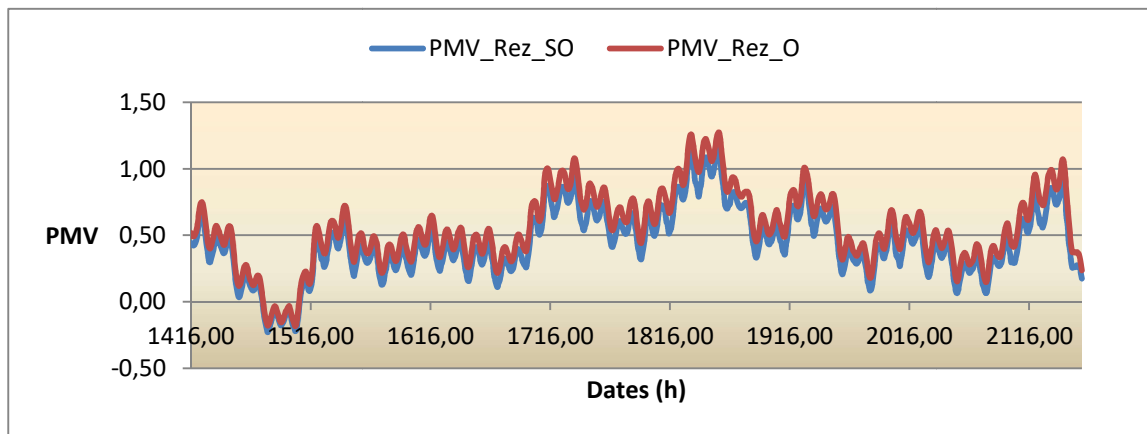


Figure 4-17 Comparaison des PMV au Rez

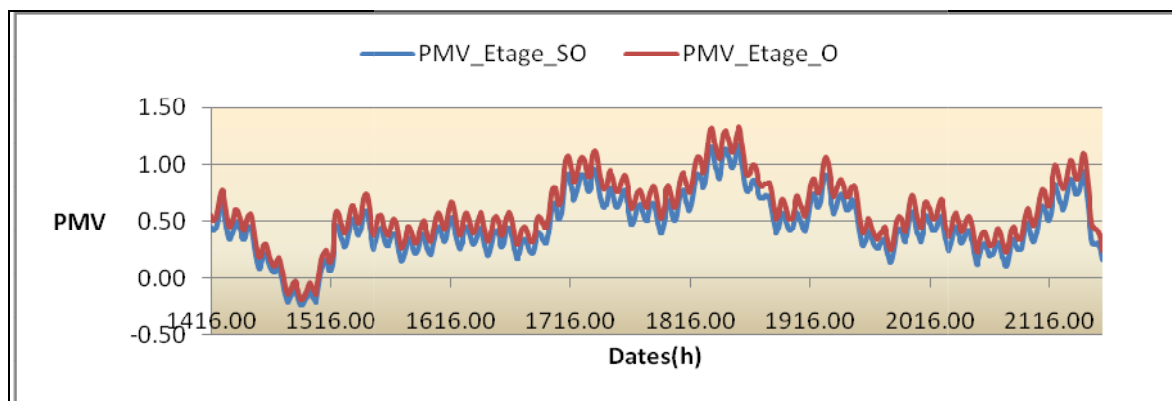


Figure 4-18: Comparaison des PMV à l'étage

Les résultats obtenus avec l'intégration d'un système d'ombrage à l'immeuble sont consignés dans les tableaux 4-5 et 4-6

Tableau 4-5 : Taux d'inconfort pour le double vitrage qui équipe l'immeuble (6/12/6 (1.66W/Km² ; 0.48))

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Durée de surchauffe (0.9/h AVEC OMBRAGE)		Durée de surchauffe (0.9/h SANS OMBRAGE)	
		heures	taux (%)	heures	taux (%)
310	Rez	146	47.09	103	33.22
	Etage	179	57.74	115	37.09

Tableau 4-6: Taux d'inconfort pour le double vitrage 4/16/4 (0.81W/Km² ; 0.632)

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Durée de surchauffe (0.9/h AVEC OMBRAGE)		Durée de surchauffe (0.9/h SANS OMBRAGE)	
		heures	taux (%)	heures	taux (%)
310	Rez	139	44.19	84	27.09
	Etage	161	51.93	100	32.25

De la même manière que le vitrage simple, lorsque le bâtiment est équipé d'un double vitrage, l'ombrage n'améliore pas le confort thermique pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le cas du simple vitrage. Cependant, on constate que le taux de surchauffe est plus bas avec le double vitrage sans ombrage par rapport au simple vitrage sans ombrage.

Par conséquent, il en vient que le double vitrage, bien qu'ayant un taux surchauffe supérieur à 5%, serait plus indiqué par rapport au simple vitrage dans cette région côtière du Bénin. Cependant, on constate que les différences de surchauffe en mode sans ombrage entre le double vitrage 6/12/6 et le simple vitrage est de 1.29% au Rez et de 0.32% à l'étage sont très peu significantes, tandis que entre le double vitrage 4/16/4 et le simple vitrage, elles sont de 7.42% et 5.16% respectivement au rez de chaussée et à l'étage.

Conclusion partielle 2: Il ya plus intérêt à équiper l'immeuble du double vitrage 4/16/4 (0.81W/Km² ; 0.632) que de l'équiper du double vitrage 6/12/6.

IV.3.2 Intégration d'un système de 'Night Cooling'

Nous avons dans cette partie, utilisé un renouvellement d'air plus important la nuit que le jour en ouvrant par exemple toutes les fenêtres. Pour cela, en utilisant le profil d'occupation de 8h à 18 h tous les jours, et un renouvellement d'air de 0.9vol/h durant la journée et 2vol/h la nuit, les simulations nous ont permis d'obtenir les résultats suivants:

IV.3.1 Cas du double vitrage

Le bâtiment étant équipé du double vitrage 6/12/6, nous testons d'abord le bâtiment avec ce vitrage : le 6/12/6(6/12/6 (1.66W/Km2 ; 0.48)). Nous avons obtenu les résultats suivants :

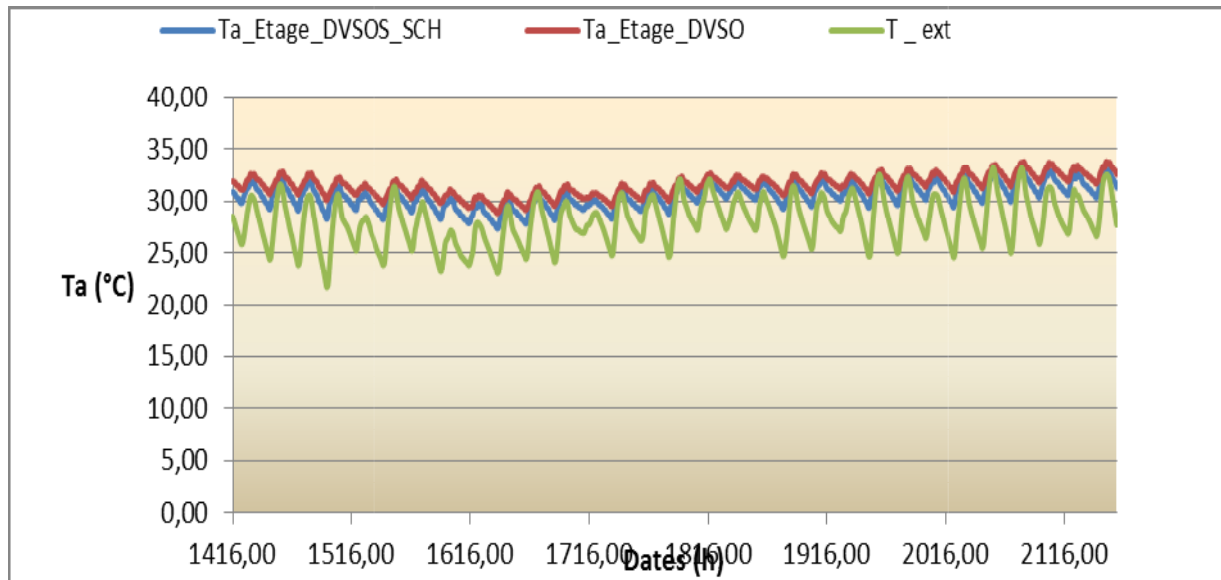


Figure 4-19 : Evolution de la température à l'étage

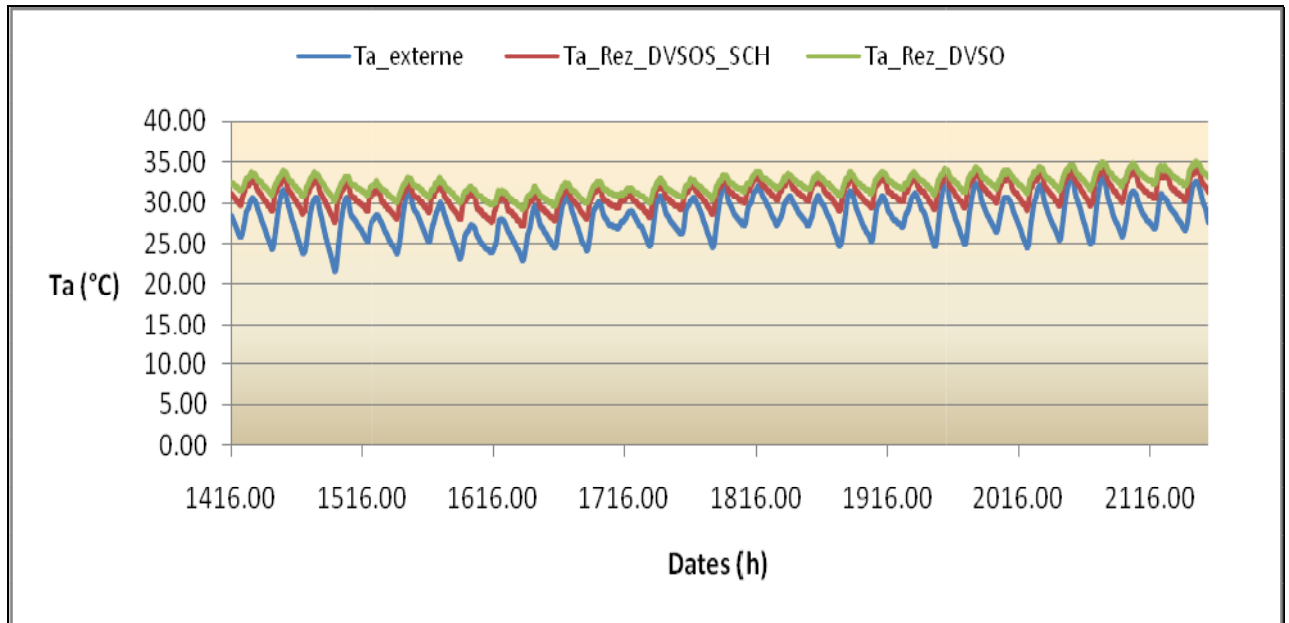


Figure 4-20 : Evolution de la température au Rez

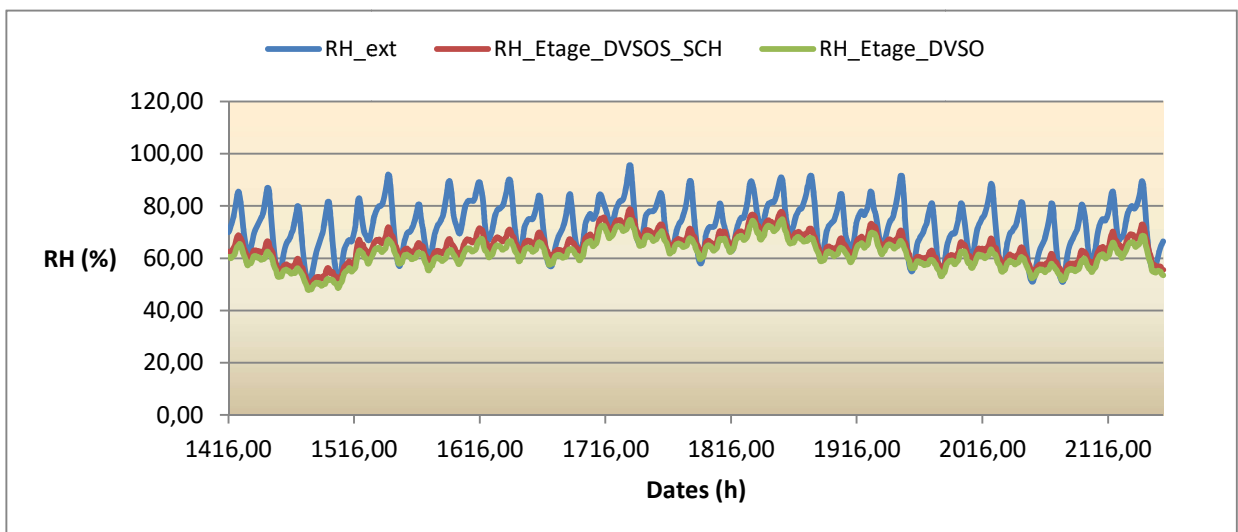


Figure 4-21 : Evolution de l'hygrométrie à l'étage

Les températures des ambiances avec le night cooling étant inférieures à celles sans night cooling, il va de soi que les humidités relatives avec la présence du night cooling sont supérieures à celles sans le night cooling (voir figures 4-21 et 22).

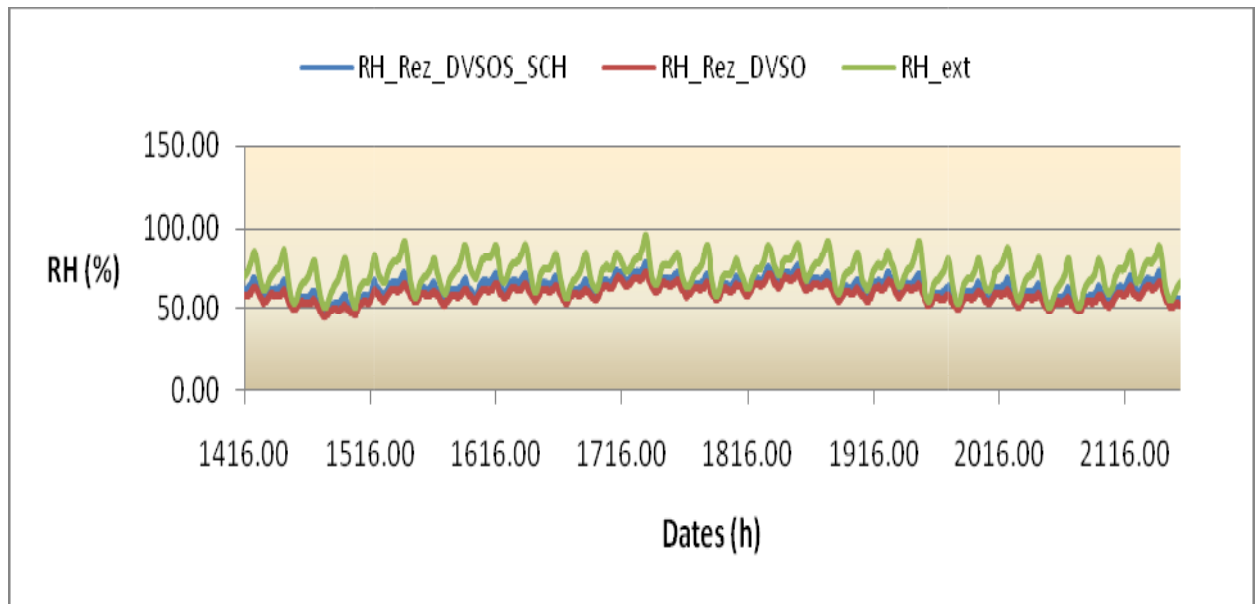


Figure 4-22 : Evolution de l'hygrométrie au Rez

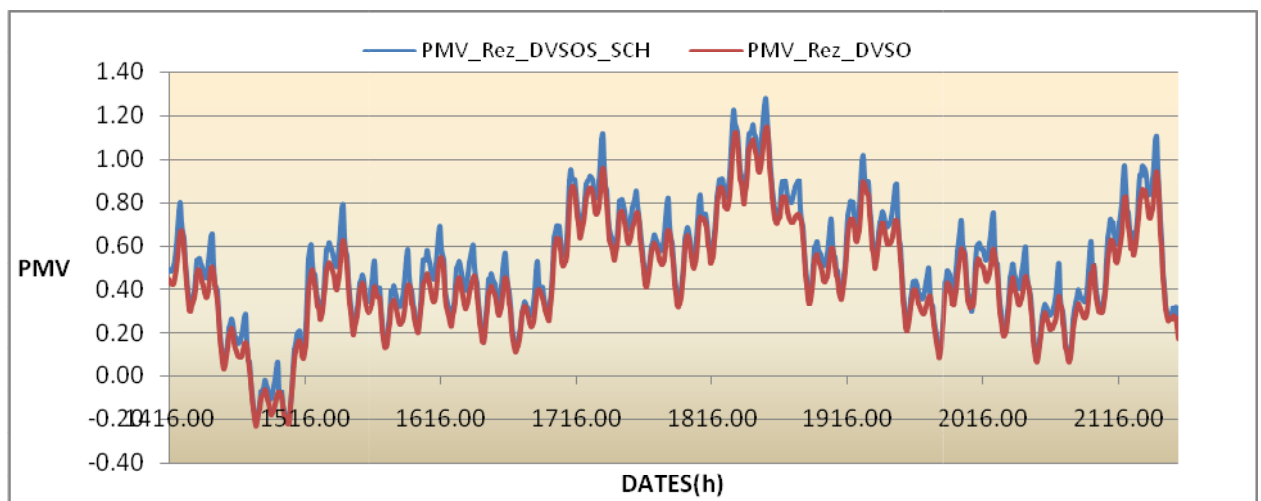


Figure 4-23 : Evolution du PMV au Rez

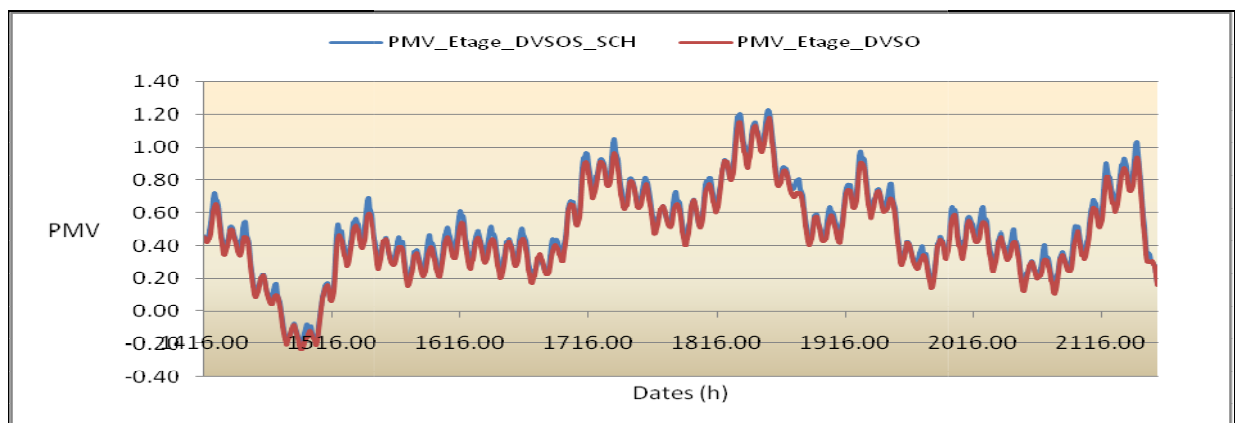


Figure 4-24: Evolution du PMV à l'étage

L'humidité sans le night cooling étant inférieure à celle de l'ambiance avec le night cooling, il en découle le PMV sans le night cooling est inférieur à celle avec le night cooling. Ce résultat était prévisible du fait de la masse d'eau présente dans l'air ambiant.

Tableau 4-7 : Taux d'inconfort pour le double vitrage qui équipe l'immeuble (6/12/6 (1.66W/Km2 ; 0.48))

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Durée de surchauffe (0.9/h SANS COOLING la nuit)		Durée de surchauffe (AVEC COOLING la nuit 0.9/h la journée contre 2/h la nuit)	
		heures	taux (%)	heures	taux (%)
310	Rez	103	33.22	112h	36.12
	Etage	115	37.09	126h	40.64

Le même test est fait avec le vitrage 4 /16/4. Les résultats sont les mêmes pour ce qui est de l'évolution des différents paramètres (température, humidité)

Tableau 4-8: Taux d'inconfort pour le double vitrage (0.81W/Km2 ;0.632)

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Durée de surchauffe (0.9/h SANS COOLING la nuit)		Durée de surchauffe (AVEC COOLING la nuit 0.9/h la journée contre 2/h la nuit)	
		heures	taux (%)	heures	taux (%)
310	Rez	84	27.09	103h	33.22
	Etage	100	32.25	111h	35.80

Le taux d'inconfort avec le vitrage 4/16/4 confirme ici sa performance par rapport à celui qui équipe actuellement l'immeuble

IV.3.2 Cas du simple vitrage

Les résultats obtenus ici sont aussi pareils qu'à ceux obtenus avec les doubles vitrages mais avec des taux d'inconfort plus élevés.

Tableau 4-9 : Taux d'inconfort pour le simple vitrage

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Durée de surchauffe (0.9/h SANS COOLING la nuit)		Durée de surchauffe (AVEC COOLING la nuit 0.9/h la journée contre 2/h la nuit)	
		heures	taux (%)	heures	taux (%)
310	Rez	107	34.51	110	35.48
	Etage	116	37.41	118	38.06

Conclusion partielle 3: Le ‘night cooling’ seul, n'améliore pas le confort thermique. Cependant, il paraît être meilleur à la situation ombagée (voir tableaux 10 et 11)

IV.3.3 Utilisation de la ventilation naturelle

Dans cette partie nous allons considérer que l'air ambiant dans l'immeuble a une vitesse de 1.5m/s, vitesse maximale pour ne pas générer des gênes liées par exemple à l'envol des papiers. La vitesse de l'air ne modifiant ni la température ni l'humidité relative, ces deux paramètres auront les mêmes variations que celles observées dans le cas du double ou simple vitrage sans ombrage. Ici la vitesse de l'air va diminuer le PMV et améliorer de cette façon le confort thermique

Tableau 4-10: Taux d'inconfort (double et Simple vitrage) vitesse de l'air ambiant $v=1.5\text{m/s}$

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Durée de surchauffe Simple vitrage sans ombrage		Durée de surchauffe Double vitrage sans ombrage	
		heures	taux (%)	heures	taux (%)
310	Rez	64	20.64	63	20.32
	Etage	41	13.22	46	14.83

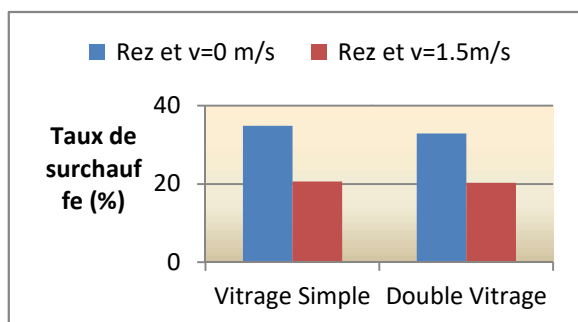


Figure 4-25 : Taux de surchauffe au rez pour différentes vitesses de l'air ambiant (v=0m/s ; v=1.5m/s)

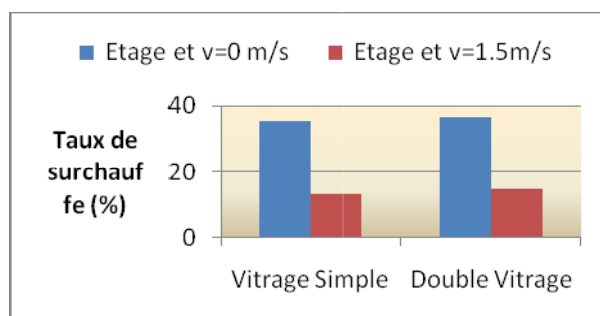


Figure 4-26 : Taux de surchauffe à l'étage pour différentes vitesses de l'air ambiant (v=0m/s ; v=1.5m/s)

Conclusion partielle 4: L'aération naturelle ou pulsée améliore le confort. Cependant pour obtenir un taux de surchauffe admis par la norme, il faut que la vitesse de l'air ambiant soit supérieure à 1.5m/s, limite admise par la littérature.

IV.3.4 Combinaison ombrage et ventilation

IV.3.4.1 Simple vitrage 4mm: V=1.2m/s

$V = 1.2 \text{ m/s}$, $\eta = 1$, η étant le facteur d'ombrage et v la vitesse de l'air ambiant, on obtient les résultats suivant :

Tableau 4-11 : Taux d'inconfort (Simple vitrage) combinaison ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant $v=1.2 \text{ m/s}$

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	7.09%	5.80%
	Etage	7.41%	5.8%

IV.3.4.2 vitrage 4/16/4 v=1.2m/s

Tableau 4-12 : Taux d'inconfort d'inconfort (Double vitrage 4/16/4)
combinaison ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant v=1.2m/s

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	9.35%	4.51%
	Etage	8.38%	4.83%

IV.3.4.3 vitrage 6/12/6 v=1.2m/s

Tableau 4-13 : Taux d'inconfort d'inconfort (Double vitrage 6/12/6)
combinaison ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant v=1.2m/s

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	10%	4.19%
	Etage	9.03%	4.83%

IV.3.4.4 vitrage simple 4mm v=1.5m/s

Tableau 4-14 : Taux d'inconfort (Simple vitrage) combinaison ombrage et
ventilation : vitesse de l'air ambiant v=1.5m/s

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	5.16%	6.45%
	Etage	5.16%	6.45%

IV.3.4.5 Double vitrage 4/16/4 v=1.5m/s

Tableau 4-15 : Taux d'inconfort (Double vitrage 4/16/4) combinaison
ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant v=1.5m/s

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	7.41%	4.51%
	Etage	6.45%	5.16%

IV.3.4.4 vitrage 6/12/6 V=1.5m/s

Tableau 4-16 : Taux d'inconfort (Double vitrage 6/12/6) combinaison ombrage et ventilation : vitesse de l'air ambiant $v=1.5\text{m/s}$

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	7.74%	4.83%
	Etage	6.77%	5.16%

Conclusion partielle 5: Avec la combinaison de l'ombrage et de la ventilation, on obtient une amélioration du confort et on est proche de la limite admise par la norme, mais avec une vitesse de l'air élevée. Ici apparaissent des inconforts de fraîcheur. Evidemment, comme l'avaient déjà remarqué plusieurs chercheurs du domaine, en climat chaud et humide, on recherche dans les bâtiments des conditions d'ambiance proches de l'extérieur, identique à celle ressentie à l'ombre sous une brise légère. La ventilation permet d'évacuer la sensation d'humidité. Dans ce cas, **le simple vitrage paraît plus performant que le double vitrage, le taux d'inconfort (surchauffe et fraîcheur) est nettement inférieure à celui du double vitrage avec une amélioration remarquable au niveau de la surchauffe avec le simple vitrage.** Ceci est dû au fait qu'avec le simple vitrage le coefficient U est plus élevé, ce qui permet d'évacuer plus de chaleur occasionnée par les rayonnements diffus (ce qui ne permet pas à l'ambiance de monter en température) par rapport au double vitrage de coefficient U plus faible.

IV.3.5 Combinaison "Nigt Cooling", Ombrage et ventilation

$\eta = 1$ et un renouvellement d'air de 0.9/h le jour contre 2/h la nuit et une ventilation avec $V=1.5\text{m/s}$: Les résultats suivants sont obtenus :

IV.3.5.1 Simple vitrage

Tableau 4-17 : Taux d'inconfort (Simple vitrage) combinaison ombrage et night cooling

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	3.87%	8.70%
	Etage	3.54%	8.38%

IV.3.5.2 Double vitrage 4/16/4

Tableau 4-18: Taux d'inconfort (Double vitrage 4/16/4) combinaison ombrage et night cooling

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	5.16%	6.45%
	Etage	4.83%	6.45%

IV.3.5.3 Double vitrage 6/12/6

Tableau 4-19: Taux d'inconfort d'inconfort (Double vitrage 6/12/6) combinaison ombrage et night cooling

Occupation immeuble (h)	Zone thermique	Inconfort	
		Surchauffe	Fraîcheur
310	Rez	5.48%	6.45%
	Etage	5.16%	6.45%

Conclusion partielle 6: Avec la combinaison de l’ombrage, de la ventilation et du “night cooling”, on obtient une amélioration du confort et on est pratiquement à la limite admise par la norme. Ici apparaissent aussi des inconforts de fraîcheur mais plus accentués qu’avec le cas de la combinaison de l’ombrage et de la ventilation. Evidemment, le taux d’humidité de l’air dans l’immeuble la nuit, refroidit l’ambiance qui n’est chauffée la journée que par la pénétration des rayonnements diffus. Ceci accroît le taux d’inconfort de fraîcheur du fait de la valeur élevée de U dans le cas du simple vitrage. En revanche, ce taux faible avec le double vitrage diminue le taux d’inconfort de fraîcheur tout en augmentant le taux d’inconfort de chaleur qui dans le même temps est amoindri par l’effet de la ventilation. Dans ce cas, **le double vitrage paraît plus performant que le simple vitrage.**

En appelant :

V1 : ventilation à $v=1.2\text{m/s}$, V2 : ventilation à $v=1.5\text{m/s}$, NC : night cooling et O : ombrage, on obtient :

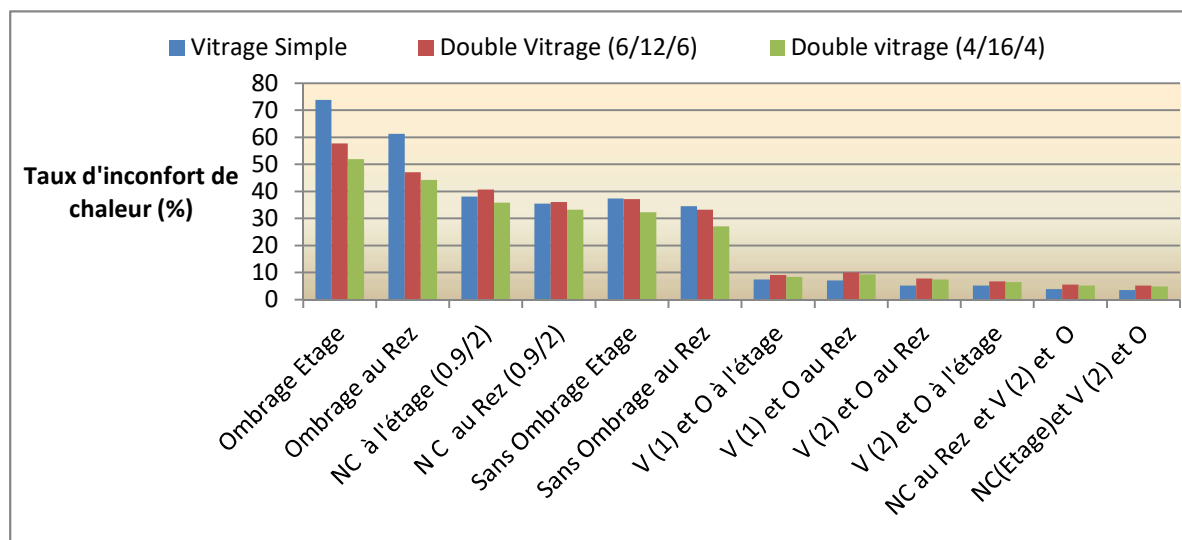


Figure 4-27 : Récapitulatif des taux d’inconfort de chaleur des différentes stratégies

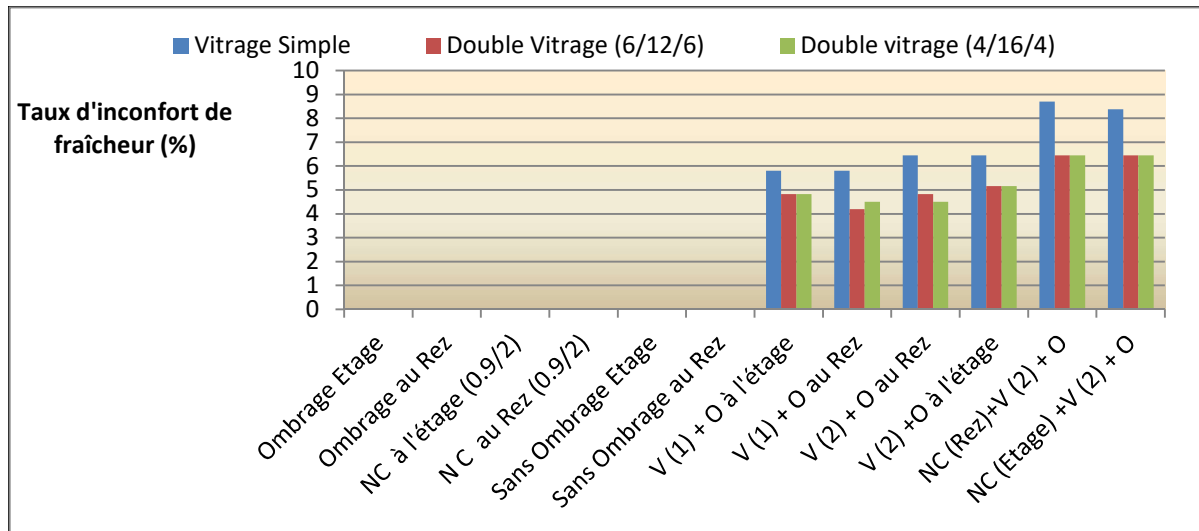


Figure 4-28 : Récapitulatif des taux d'inconfort de fraîcheur des différentes stratégies

IV.3.6 Climatisation active

Aucune des stratégies étudiées ne permettant d'obtenir le taux de surchauffe admis par la réglementation (5%), nous avons été obligés d'utiliser une climatisation active pour améliorer le confort thermique de l'immeuble. Pour cela, nous nous sommes proposé dans un premier temps, d'utiliser comme consigne de contrôle du climatiseur, les paramètres garantissant le confort aussi bien en climat tempéré que dans la bande côtière du Bénin, du fait que le bâtiment test est une institution financière où doivent collaborer des expatriés et des autochtones. Ceci revient alors dans un premier temps, à utiliser des paramètres définissant la zone de confort commune au climat de la bande côtière du Bénin et de celle du climat tempéré (voir II.6.2 du chapitre 2) comme consigne de régulation du climatiseur. Dans un second temps, nous avons utilisé des paramètres en dehors de cette zone comme consignes du régulateur.

IV.3.6.1 Consignes de régulation du climatiseur, éléments de la zone de confort commune au climat tempéré

Le triangle en couleur jaune de la figure 4-29 représente la zone de confort commune au climat tempéré et au climat tropical et humide de la zone côtière du Bénin (voir chapitre 2). Les couples (t_a , RH) pour lesquels le confort est atteint simultanément pour les deux types de climats sont les couples (24.90°C , 66%) ; (25°C , 66%) ; ($t_a^{\circ}\text{C}$, 68%) $24.20^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 25^{\circ}\text{C}$.

Pour des valeurs de températures et d'hygrométrie respectivement égales à 25°C et 68% , nous avons fait des simulations et avons déterminé les différentes demandes énergétiques sensible et latente de l'immeuble aussi bien que pour le simple vitrage 4mm que pour le double vitrage $4/16/4$ retenus dans notre étude. Les résultats obtenus sont présentés aux figures 4-30 et 4-31

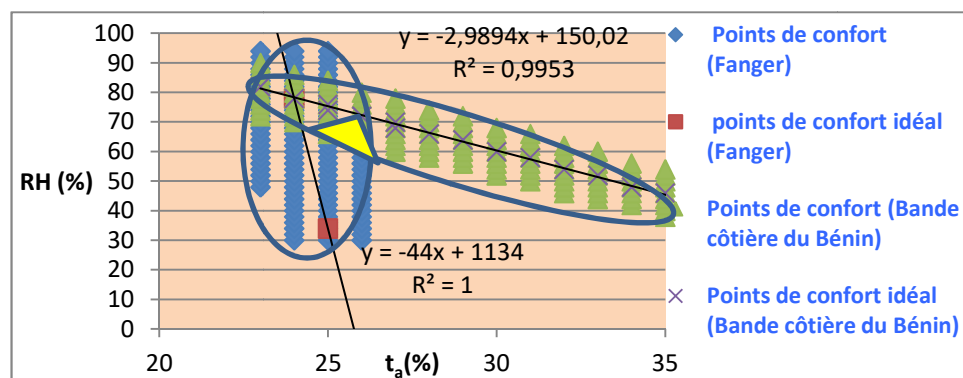


Figure 4-29 : Mise en évidence de la zone de confort commune au climat tempéré et à celui de la bande côtière du Bénin

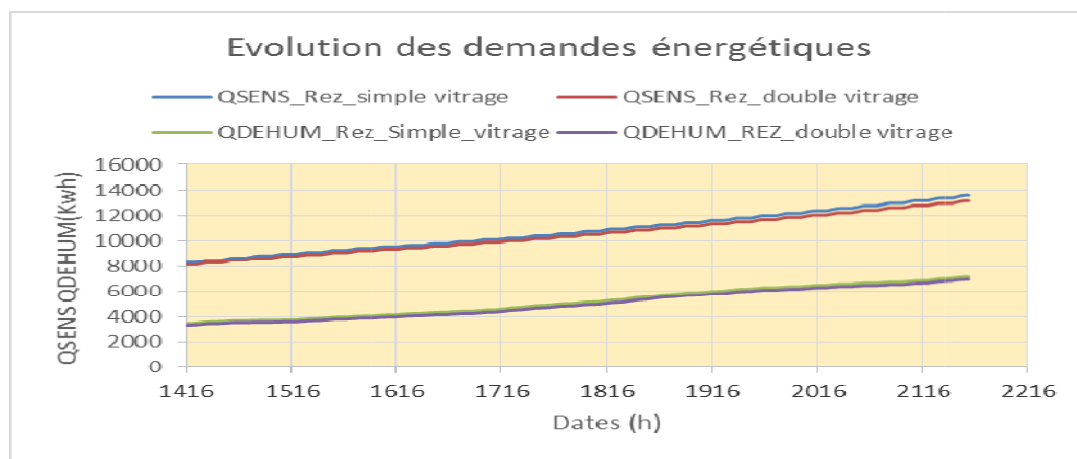


Figure 4-30 : Evolution de la demande énergétique de l'immeuble (Rez de chaussée) pour les paramètres de contrôle appartenant à la zone de confort commune aux deux différents climats (paramètres de contrôle $T_a=25^{\circ}\text{C}$ et $\text{RH}= 68\%$)

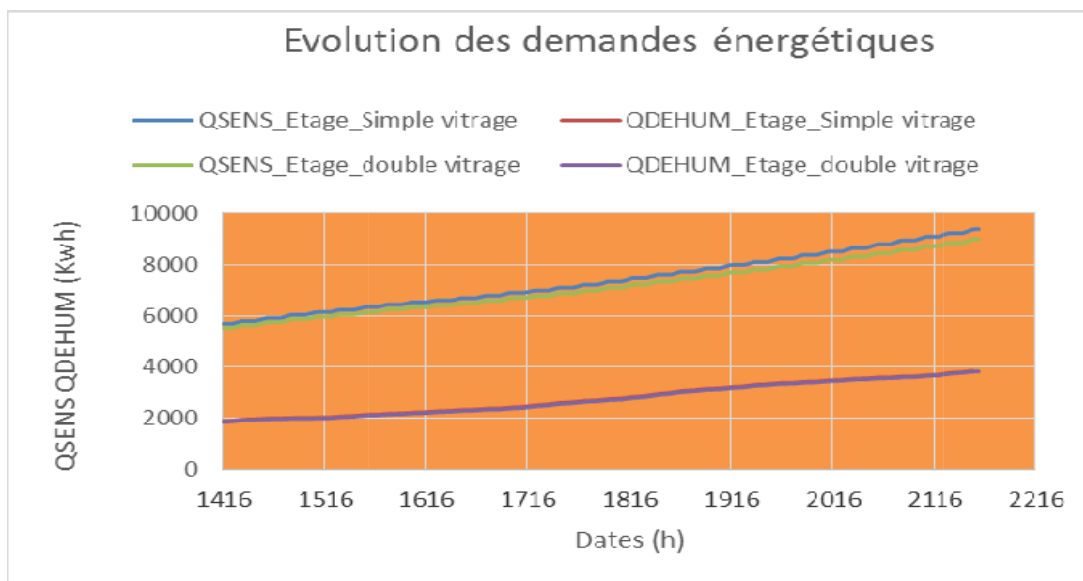


Figure 4-31 : Evolution de la demande énergétique de l'immeuble (Etage) pour les paramètres de contrôle appartenant à la zone de confort commune aux deux différents climats (paramètres de contrôle $T_a=25^{\circ}\text{C}$ et $RH=68\%$)

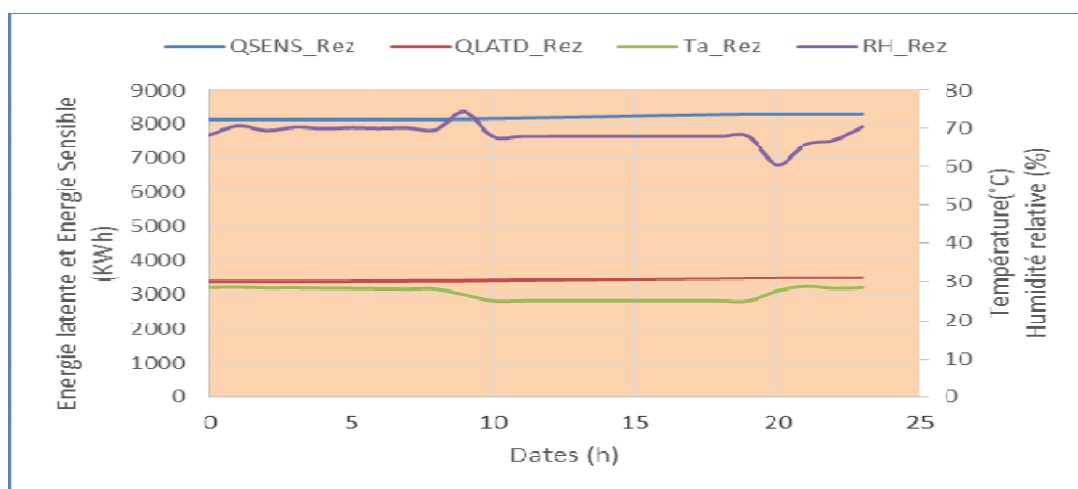


Figure 4-32 : Mise en œuvre du contrôle de la température et humidité relative au Rez

Les figures 4-31 et 4-32 nous montrent que les demandes énergétiques latentes et sensibles sont presque les mêmes aussi bien que pour la présence du simple vitrage que de celle du double. Cette égalité en valeur s'explique par le fait que les températures et les humidités relatives sont très peu différentes l'une de l'autre (simple ou double vitrage) (voir figures 4-33 (a et b)). La climatisation

est mise en route à 8 heures du matin et éteinte en fin de journée à 19 heures : à travers nos simulations, on remarque qu'au bout de deux heures environ soit autour de 10 heures les valeurs des consignes sont atteintes (voir figure 4-32). L'extinction de la climatisation n'étant pas instantanée ; l'effet de la régulation se poursuit jusqu'à 21 heures ; moment à partir duquel l'effet de la réflexion de l'énergie emmagasinée des parois des habitations environnantes et surtout les parois de l'immeuble lui-même dans la journée continuent de se faire sentir jusqu'à environ 24 heures ; malgré l'absence du soleil. Ceci rend la température à l'extérieur (figure 4-36), supérieure à celle de l'intérieur favorisant ainsi le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur de l'immeuble. Le coefficient U étant plus faible avec la présence du double vitrage que celle du simple, il s'en suit qu'à partir de 21 heures, la température à l'intérieur de l'immeuble dans le cas du simple vitrage devient plus élevée que celle du double vitrage (voir figures 4-33 c et d). L'humidité relative étant presque la même pour le simple vitrage que pour le double (voir figures 4-34 a et b) ; la température ambiante devient l'élément discriminant du PMV. Il en vient que de 21 heures à 24 heures il fait plus chaud avec le simple vitrage qu'avec le double vitrage (voir figure 4-35). A partir de 24 heures ; la température extérieure devient moins élevée que celle intérieure et la présence du double vitrage favorisant très peu de déperdition de chaleur vers l'extérieur pour le double vitrage que pour le simple vitrage ; il en vient que de 24 heures à 8 heures du matin le double vitrage procure plus une sensation de chaleur par rapport au simple vitrage (voir figures 4-35). En régime établi ; le double vitrage semble être plus confortable que le simple vitrage.

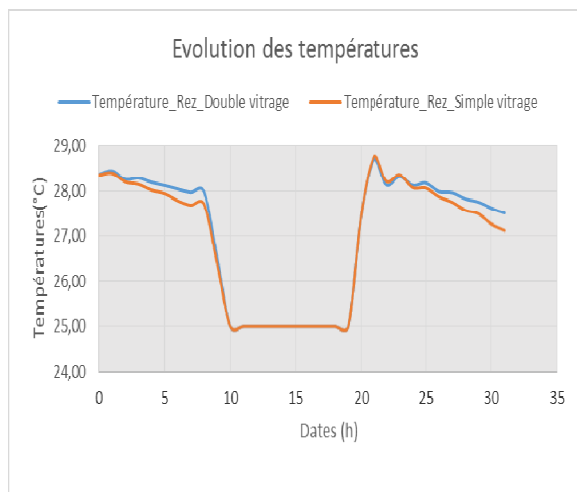


Figure 4-33a : Evolution au rez

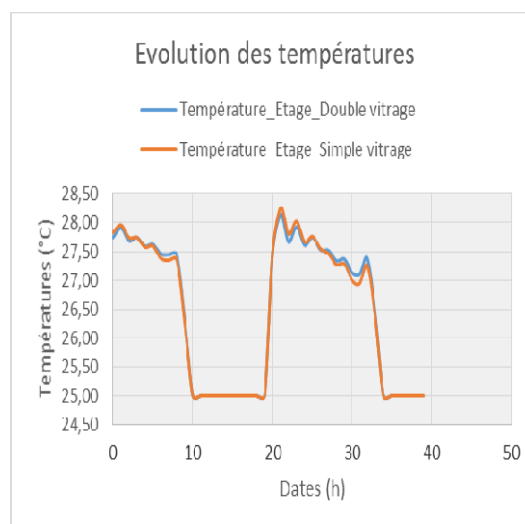


Figure 4-33b : Evolution à l'étage

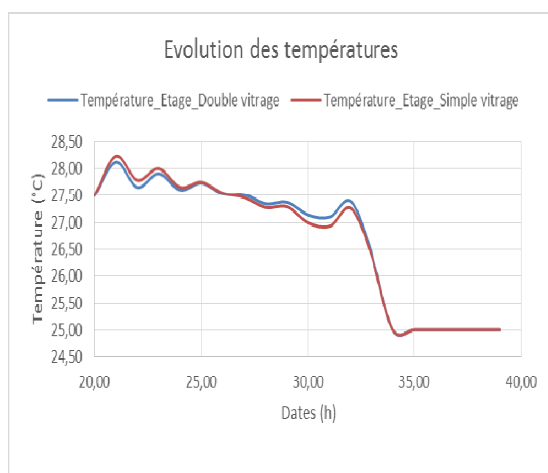


Figure 4-33c : Evolution des températures à l'étage pendant une journée

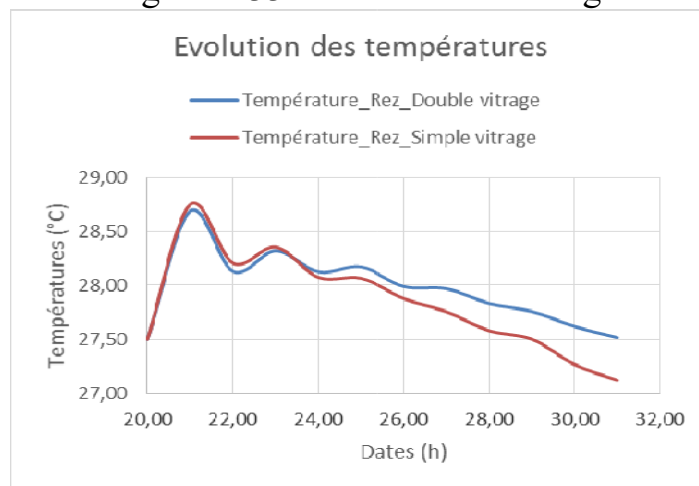


Figure 4-33d : Evolution des températures au rez de chaussée pendant une journée

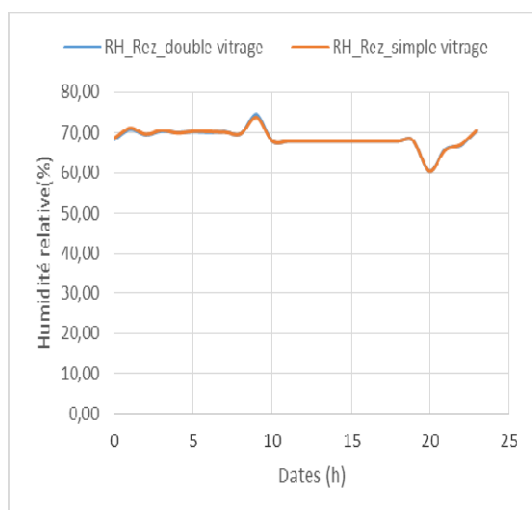


Figure 4-34a : Evolution des humidités Au rez pendant une journée

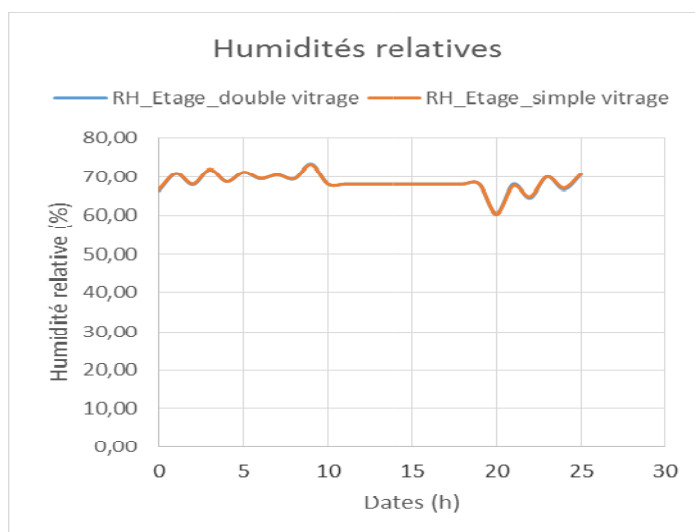


Figure 4-34b : Evolution des humidités à l'étage pendant une journée

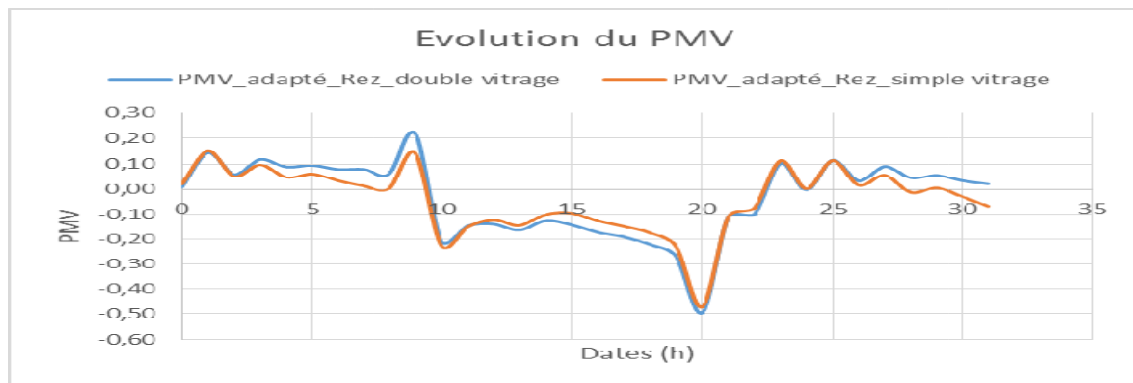


Figure 4-35 : Evolution des PMV au rez

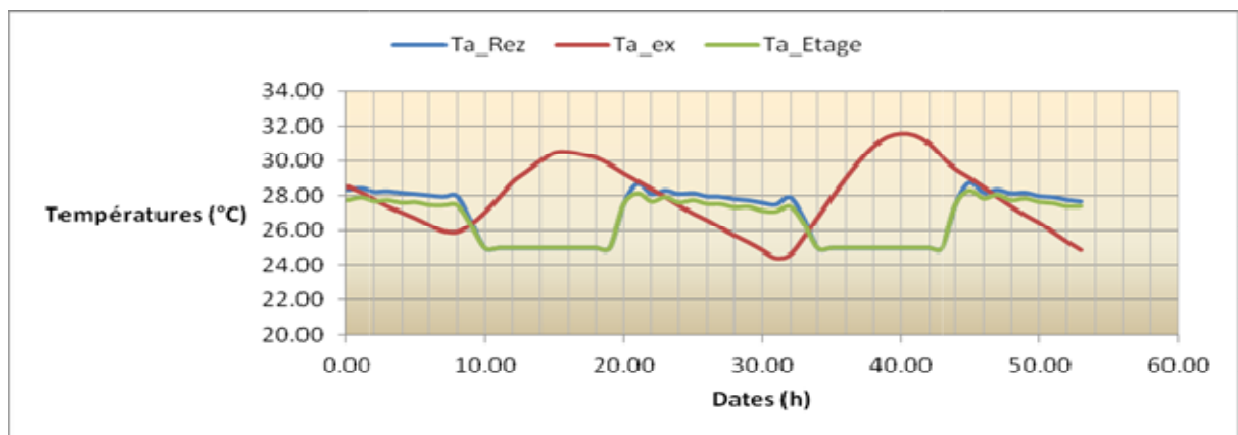


Figure 4-36 : Evolution des températures externe et internes

En effet dans cette zone, dite zone de confort commune aux deux climats ; la sensation thermique des individus est celle prédite par FANGER sans correction. Par conséquent, le terme ΔPMV (voir chapitre 2) n'a pas d'effet dans cette zone; ceci est d'autant plus vrai qu'il s'explique par le comportement thermique des différents vitrages qui est analogue à celui que l'on leur reconnaît.

En tenant compte de la période d'occupation de l'immeuble, mais en supposant que même les week-ends, l'immeuble est occupé pour permettre à certains agents de pouvoir venir travailler s'ils le désirent, l'énergie d'utilisation de l'immeuble (somme des énergies d'utilisation au rez et à l'étage), serait $E_{U,G} = (8689.78)kwh + (5424.48)kwh = 14111.26kwh$ au mois de mars.

Si nous considérons que l'immeuble est non occupé le weekend, alors la demande énergétique totale (sensible et latente) du bâtiment durant le mois de mars sera : $(14111.26 - (2262.51 + (69.36 \times 4 \times 2)))kwh = 11293.87kwh$, la demande énergétique sensible journalière moyenne au mois de mars étant de $282.81kwh / jour$, soit $282.81kwh \times 8 jours = 2262.50kwh$ et celle latente $69.36kwh \times 8 jours = 554.88kwh$ pour les 8 jours de weekend pendant lequel l'immeuble pendant lesquels l'immeuble est inoccupé durant le mois.

Le rez de chaussée est composé d'un grand hall d'une surface de $S=277.13m^2$ et de hauteur 4m, d'une toilette de surface $S1= 13.94m^2$, d'une salle d'archive de surface $S2=15.27m^2$, d'une salle informatique de $S3= 4.54m^2$, il en vient que la surface à climatiser au rez de chaussée est de

$$S_{rez} = (277.13 + 13.94 + 15.27 + 4.54)m^2 = 310m^2$$

D'un volume de $562.73m^3$, le premier étage est constitué aussi d'un hall et d'une toilette. La surface climatisée à l'étage est de $s_{étage} = 131.48m^2$. Par conséquent, l'énergie d'utilisation par mètre carré sera : $1129387kwh / (310.88 + 131.48) = 25.53kwh / m^2$

La consommation spécifique recommandée pour les pays subsahariens pour une économie d'énergie dans des immeubles d'institution financière étant $185kwh/m^2.an$ [78], soit en moyenne $15.41kwh/m^2$ par mois, il en vient que l'utilisation du vitrage le plus performant 4/16/4 du point de vue énergétique avec une climatisation active tout en choisissant les paramètres de contrôle dans la zone de confort commune à la bande côtière du Bénin et au climat tempéré ne permet pas d'économiser de l'énergie, malgré qu'il soit plus confortable que le simple vitrage.

IV.3.6.2 Consignes de régulation du climatiseur, éléments hors de la zone de confort commune au climat tempéré

On choisit cette fois ci de réguler la température ambiante de l'immeuble à 29°C et l'humidité relative à 63% où (29°C, 63%) n'est plus un couple appartenant pas à la zone de confort commune aux deux climats. Comme précédemment, nous avons évalué les demandes énergétiques de l'immeuble avec les deux différents types de vitrage. Sur la figure 4-37, on constate que l'énergie sensible dans le cas du double vitrage est supérieure à celle du cas du simple ; tandis que les énergies latentes sont presque les mêmes. En revanche, l'énergie totale du double vitrage reste nettement supérieure à celle du simple (voir figure 4-37). La différence nette entre les énergies sensibles s'explique par les différences nettes entre les températures à l'intérieur de l'immeuble lorsqu'il est équipé de l'un ou l'autre des vitrages. Cette différence se manifeste par la supériorité de la température avec le double vitrage qui a une valeur de U faible par rapport à celle du simple vitrage voir figures 4-38 et 4-39. Cette faible valeur de U entraîne une faible déperdition de chaleur vers l'extérieur dont la température est faible par rapport aux différentes températures à l'intérieur de l'immeuble (voir figures 4-39 et 4-41) ; ce qui explique alors la supériorité de la température à l'intérieur lorsque l'immeuble est équipé du double vitrage par rapport au cas du simple vitrage. En revanche cette supériorité de la température intérieure dans le cas du double vitrage entraîne l'effet inverse au niveau des humidités relatives (diagramme psychrométrique) ; ceci est ici illustré par aux figures 4-42 et 4-43

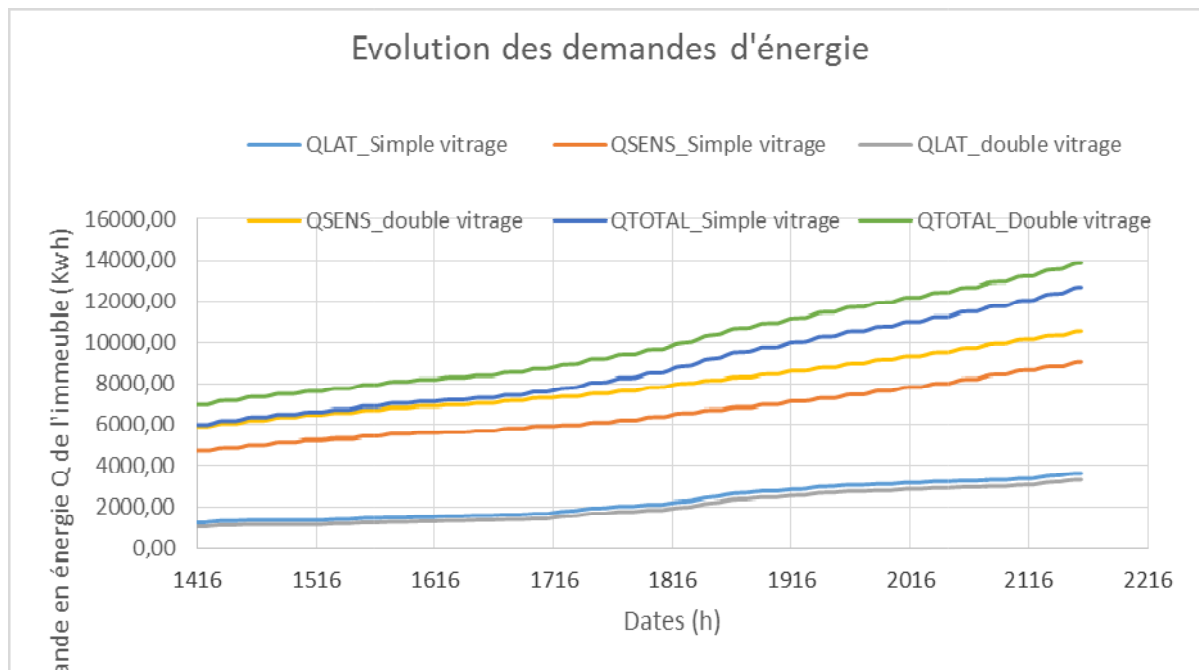


Figure 4-37 : demande énergétique de l'immeuble

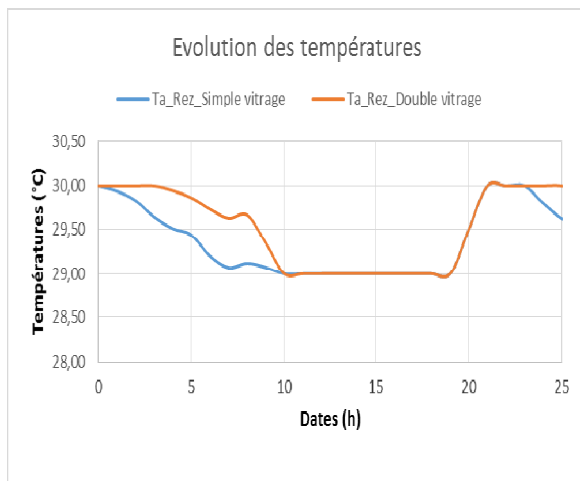


Figure 4-38 : Evolution des températures au rez de chaussée

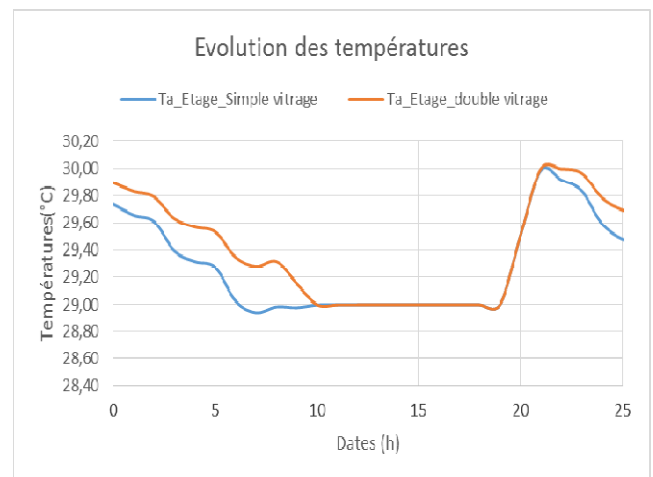


Figure 4-39 : Evolution des températures à l'étage

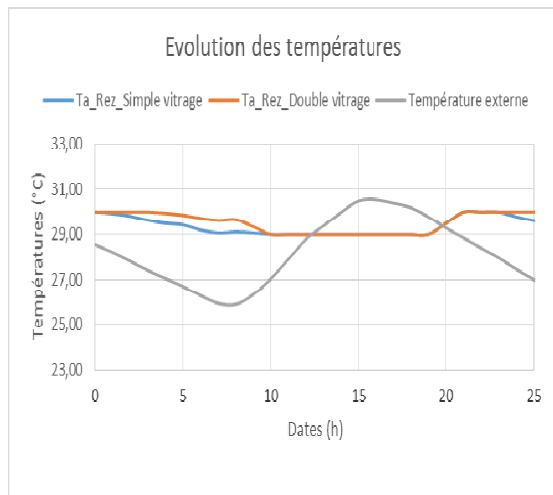


Figure4-40 Températures au rez

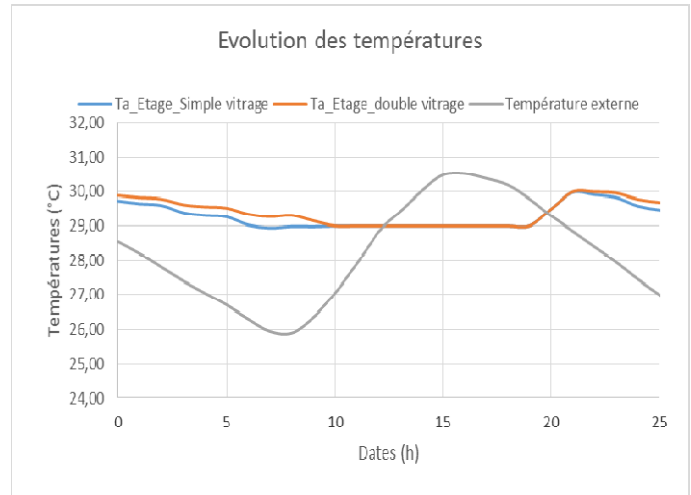


Figure4-41 : Températures à l'étage

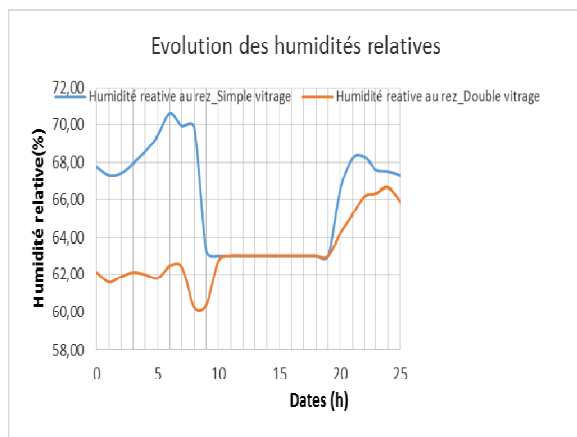


Figure 4-42 : hygrométries au rez

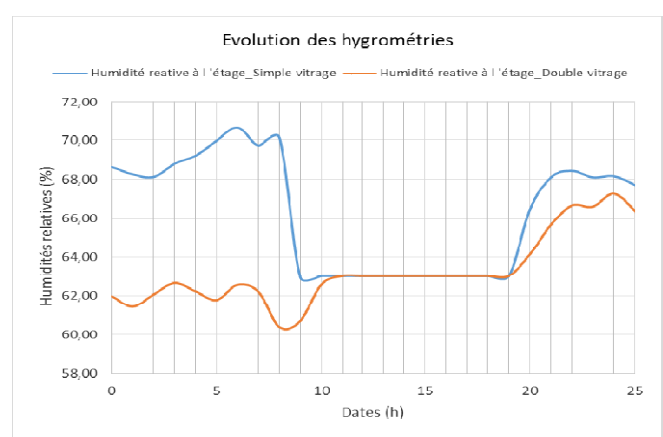


Figure 4-43 : hygrométries à l'étage

A partir d'environ 10h du matin, la régulation, mise en route depuis 8 heures atteint son régime stationnaire, et les paramètres contrôlés sont stabilisés aux valeurs de consignes exigées (29°C, 63%). La température intérieure de l'immeuble en présence du double vitrage étant supérieure à celle en présence du simple vitrage entre 0 heure et 8 heures, le passage aux consignes de contrôle entraîne aussi bien qu'avec la présence du simple vitrage que le double une baisse de température d'un même ordre de grandeur (voir figure 4-38 et 4-40). En revanche, il crée une montée en humidité relative pour le double vitrage et une baisse en humidité pour le simple vitrage (voir figure 4-42 et 4-43) de 8 heures à 10 heures. Par conséquent, la baisse en humidité

relative pour le simple vitrage entraîne une amélioration du confort par rapport au double vitrage pendant le régime permanent du système de régulation où la température et l'humidité sont stabilisées aux mêmes valeurs de consigne, aussi bien pour le double vitrage que pour le simple vitrage. En effet, on se serait posé la question de savoir l'origine de cette différence en matière de sensation thermique, étant donné que les paramètres de confort à savoir température ambiante ; humidité relative, vitesse de l'air ambiant....., sont identiques dans les deux cas de figure (double et simple vitrage) ? Ne pourrait – on pas alors attribuer ceci à la manifestation de l'aspect adaptatif du modèle de FANGER adapté à la bande côtière du Bénin en terme de prise en compte du passé thermique et de la sensation antérieure de l'individu comme nous l'avons remarqué au chapitre 2 ? Evidemment pour une même chute (pour les deux types de vitrages) de température (entre 29°C et 30°C), un individu partant d'une situation de faible humidité relative pour une humidité plus élevée se sentira moins confortable dans la situation d'humidité plus élevée ! Partant de cette remarque et à notre humble avis ; il semblerait que l'amélioration du confort due à la présence du simple vitrage dans cette zone de confort en dehors du triangle représentant la zone de confort commune au climat tempéré et celui de la bande côtière du Bénin doit provenir de ce passé thermique et hygrométrique immédiat avant le régime stationnaire du climatiseur. Ceci dans une certaine mesure conforterait les résultats précédemment obtenus ci-dessus en matière de performance énergétique du bâtiment !

Lorsqu'on considère que l'immeuble n'est occupée que dans la journée entre 8h et 19h, les demandes en énergie, il en vient que l'énergie d'utilisation de l'immeuble serait :

$E_{U,G} = (8400.15 - 4042.17)kwh + (4312.33 - 1951.32)kwh = 6718.99kwh$ au mois de mars (les weekends ne sont pas pris en compte)

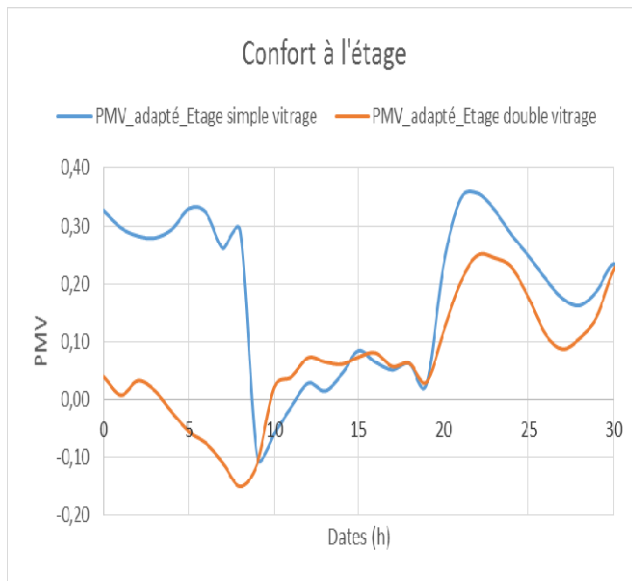


Figure 4-44 : confort à l'étage

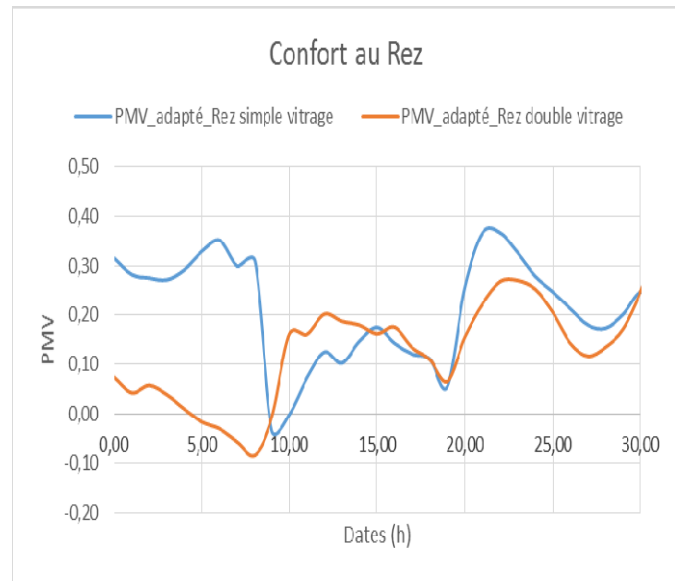


Figure 4-45 : confort au rez

Par conséquent, l'énergie d'utilisation par mètre carré sera :

$$67189Kwh/(31088+13148)=15,18kWh/m^2$$

La consommation spécifique recommandée pour les pays subsahariens pour une économie d'énergie dans des immeubles d'institution financière étant $185kWh/m^2.an$, soit en moyenne $15,41kWh/m^2$ par mois, il en vient que l'utilisation du double vitrage 4/16/4 permet ici aussi d'économiser de l'énergie. Cette économie d'énergie est fonction des paramètres de consigne. La demande d'énergie totale étant beaucoup plus influencée par l'énergie sensible, on pourra dire ici une descente plus accrue en température fera appel à une dépense excessive en énergie.

Conclusion

La seule façon d'améliorer le confort serait d'utiliser une climatisation active et le double vitrage semble être plus performant que le simple vitrage en choisissant les paramètres de contrôle du confort dans la zone de confort commune au climat de la bande côtière du Bénin. En dehors de cette zone, c'est le simple vitrage qui paraît plus performant. Cependant, les performances des différents vitrages sont très peu différentes l'une de l'autre en dehors de la zone comme de confort aux deux climats. Il se pose alors la question de savoir

comment choisir le double vitrage ou le simple vitrage pour que le bâtiment soit plus performant?

IV.4 Pré- outil d'aide à l'optimisation de choix de vitrage des bâtiments administratifs dans la bande côtière du Bénin

Aucun des vitrages testés et aucune des stratégies mises en œuvre n'améliore le confort thermique des bâtiments vitrés dans la bande côtière du Bénin sans appel d'énergie. Seule une climatisation active pourra permettre de déshumidifier l'ambiance et la rendre confortable. Plus le taux d'inconfort sera élevé, plus la climatisation active sera sollicitée.

Pour cela, il serait bon d'initier dans cette bande côtière du Bénin, un outil d'aide pour optimiser le choix des vitrages de bâtiment administratif parmi plusieurs dans cette région.

A l'aide de nos différents tests, nous avons voulu initier la mise au point d'une stratégie d'aide au choix de vitrages. Pour cela une modélisation du taux d'inconfort des bâtiments administratifs vitrés dans la bande côtière du Bénin a été réalisée.

Une régression multilinéaire du taux d'inconfort en fonction de U, g, et S, S étant la surface vitrée, pour les deux différents types de vitrage nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

IV.4.1 Vitrage Double

Les différentes simulations faites avec le double vitrage sans l'intégration d'aucune stratégie, nous a permis d'obtenir les valeurs suivantes.

Tableau 4-20 : Taux d'inconfort des doubles vitrages en fonction de U, g ;et S

U	g	S	Taux d'inconfort
1.4	0.622	8	34.83
1.4	0.622	2.04	41.29
1.29	0.333	8	37.09
1.29	0.333	2.04	44.83
0.81	0.632	8	27.09

U	g	S	Taux d'inconfort
0.81	0.632	2.04	32.25
1.05	0.424	8	32.9
1.05	0.424	2.04	40.96
1.4	0.589	8	29.67
1.4	0.589	2.04	35.48
1.27	0.591	8	28.7
1.27	0.591	2.04	34.19
1.27	0.624	8	27.41
1.27	0.624	2.04	33.54
1.26	0.397	8	34.83
1.26	0.397	2.04	41.93
1.3	0.298	8	38.8
1.3	0.298	2.04	47.74
1.26	0.212	8	40.32
1.26	0.212	2.04	53.54
1.24	0.642	8	27.41
1.24	0.642	2.04	54.19
1.24	0.584	8	29.67
1.24	0.584	2.04	34.51
1.66	0.48	8	32.9
1.66	0.48	2.04	36.45
1.05	0.39	8	34.83
1.05	0.39	2.04	39.67
2.83	0.755	8	31.93
2.83	0.755	2.04	35.8

Tableau : 4-21 : synthèse de la régression

	Synthèse de la régression ; Variable dépendante : Taux d'inconfort R ² = 0.88 F(2, 28)=66.716 p<0.0000 Erreur type de l'estimation : 13.50			
N=30	B	Erreur type de b	t(27)	Valeur de p
U	16.61	5.50444	3.017837	0.005
G	19.71	15.08026	1.307294	0.202
S	0.24	0.76269	0.326329	0.746

Si nous appelons T le taux d'inconfort, on pourra écrire la relation suivante :

$$T = 17U + 20g + 0.24S \quad (4-4)$$

Les coefficients de g et de S sont obtenus avec valeurs de p importantes supérieures au seuil 0.05(voir tableau 4-21). Cela voudrait dire que la probabilité selon laquelle les variables g et S n'ont aucun effet significatif sur

nos résultats est élevée. Pour cela nous allons reprendre la régression linéaire tout éliminant l'un après l'autre les variables g et S de notre étude.

- Elimination de S

Tableau 4-22 : Synthèse de la régression

	Synthèse de la régression ; Variable dépendante : Taux d'inconfort R ² = 0.88 F(2,28)=103.32 p<0.0000 Erreur type de l'estimation : 13.276			
N=30	B	Erreur type de b	t(28)	Valeur de p
U	16.99	5.294	3.20	0.0033
G	21.01	14.306	1.469	0.15

Ici, on constate encore que pour la variable g, p est encore élevé et supérieur au seuil de 5% (voir tableau 4-22). Nous allons éliminer cette fois ci g et poursuivre la régression

- Elimination de g

Tableau 4-23 : Synthèse de la régression

	Synthèse de la régression ; Variable dépendante : Taux d'inconfort R ² = 0.87 F(1,29)=196.62 p<0.00000 Erreur type de l'estimation : 13.276			
N=30	B	Erreur type de b	t(28)	Valeur de p
U	24.25	1.73	14.022	0.00000

Par conséquent, on pourra écrire :

$$T = 24.35U \quad (4-5)$$

Par conséquent, on dira que pour le double vitrage, plus le coefficient U est grand, plus est élevé le taux d'inconfort de chaleur. Par conséquent, pour avoir un taux d'inconfort moindre, il faut choisir le double vitrage qui a le coefficient de déperdition de chaleur U le plus petit possible.

Evidemment, plus le taux de U est élevé, plus il y aura de déperdition de la chaleur de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur, et moins l'air ambiant sera chauffé et plus il lui sera difficile à se déplacer. En diminuant U, on diminue aussi de manière indirecte g qui caractérise la transmission énergétique de l'énergie de l'extérieur vers l'intérieur.

En définitif, de tous les doubles vitrages testés comme le montre la figure 4-12 plus haut, le plus performant des vitrages, est le double vitrage 4/16/4 de facteur $U=0.81$ qui a le plus petit coefficient de déperdition de chaleur. Mais comme le stipule le II.6 de ce chapitre, le 4/16/4 ne permet pas une économie d'énergie. Par conséquent, il va falloir tester d'autres types de double vitrage avec un coefficient U beaucoup plus petit

IV.4.2 Simple vitrage

En faisant usage des taux d'inconfort des simples vitrages les plus utilisés au Bénin, on obtient :

Tableau 4-24 : Taux d'inconfort des simples vitrages en fonction de U , g ; et

Type	U	g	S	Taux d'inconfort
Float bleuté 4mm	5.48	0.38	8	51.6
Bronze 4mm	5.48	0.67	8	39.4
VABfloat fumé	5.45	0.48	8	45.48
Clair float 3mm	5.51	0.88	8	34.84
Clair float 5mm	5.45	0.81	8	35.4
Clair float 4mm	5.48	0.88	8	34.84
Float bleuté 4mm	5.48	0.38	2.04	63.54
Bronze 4mm	5.48	0.67	2.04	48.38
VABfloat fumé	5.45	0.48	2.04	58.38
Clair float 3mm	5.51	0.88	2.04	41.29
Clair float 5mm	5.45	0.81	2.04	41.9
Clair float 4mm	5.48	0.88	2.04	41.29

Tableau 4-25 : Synthèse de la régression

Synthèse de la régression ; Variable dépendante : Taux d'inconfort $R^2 = 0.99$ $F(3, 9)=2461$ $p<0.00000$ Erreur type de l'estimation : 1.8367				
N=12	b	Erreur type de b	t(27)	Valeur de p
U	14.40	0.39	36.80	0.000000
G	-39.06	2.73	-14.26	0.000000
S	-1.48	0.17	-8.32	0.000016

$$T = 14.40U - 39.06g - 1.48S \quad (4-6)$$

Les différents coefficients sont obtenus avec un $R^2 = 0.99$ et une valeur de p très faible inférieure au seuil de 5% (voir tableau 4-25). Ce qui montre la validité du modèle pour les valeurs mesurés.

En analysant l'équation (6), on peut dire ce qui suit :

Le coefficient de U étant positif, on en déduit que plus la valeur de U est élevée, plus grande, est la valeur de T soit le taux d'inconfort. En effet plus la valeur de U est grande, plus la quantité de déperdition d'énergie de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur est élevée, moins l'ambiance est chauffée et plus élevé est le taux d'humidité et plus inconfortable est alors l'ambiance. Donc il faut choisir un vitrage avec une petite valeur de U

Le coefficient de g étant négatif, on en déduit que plus le coefficient g est grand, plus petit sera T le taux d'inconfort. En effet lorsque le pourcentage de transmission solaire est élevé, la température de l'ambiance devient élevée et par conséquent l'humidité relative devient basse et l'air ambiant a plus de facilité à se déplacer. Par conséquent, le confort de l'ambiance est amélioré. Donc, il faut alors choisir des vitrages avec une valeur de g élevé.

De la même manière que g , il faut choisir une valeur de S plus grande.

IV.5 Conclusion

Des 6 échantillons de verre utilisé dans le bâtiment dans la bande côtière du Bénin , le simple vitrage garantit mieux les conditions hygrothermiques d'ambiance. Cependant, une légère amélioration est obtenue avec le double vitrage, malgré que aucun de ces deux types de vitrages ne permettent d'avoir le taux d'inconfort admise par la norme. Ceci étant la seule façon d'améliorer la performance des bâtiments administration à fenestration en vitre serait de prévoir une climatisation active dont les consignes de contrôle devront dépendre du type de verre utilisé pour le vitrage.

Pour les choix des vitrages, il faudra tenir compte des critères de sélection suivants :

- Simple vitrage
 - Une petite valeur de U
 - Une valeur élevée de g
 - Une valeur élevée de S

Cependant, en fonction des objectifs visés, il faut établir un compromis entre les valeurs de U, g et S

- Double vitrage :
 - faible valeur de U.

CHAPITRE 5 : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

V.1 Introduction

De nos jours, on n'envisage plus le choix d'un produit sans tenir compte des aspects environnementaux qu'implique ce choix. Pour cela, dans cette partie de nos travaux, il a été nécessaire d'évaluer dans un premier temps les impacts environnementaux des vitrages optimaux pour le bâtiment test, objet de notre thèse. En s'appuyant sur les fiches de déclarations environnementales obtenues de la base de données INIES pour le double vitrage et de celle du simple vitrage 4 mm SGG PLANILUX, SGG PLANITHERM & SGG COOL –LITE de la société SAINT-GOBAIN (en annexe), nous avons procédé à l'impact environnemental du simple vitrage 4mm et du double vitrage 4/16/4 retenus pour le bâtiment test. Une étude comparée a été faite pour apprécier l'alternative la plus indiquée pour la bande côtière du Bénin qui prend en compte les objectifs du millénaire pour la préservation de l'environnement.

De nos jours, l'évaluation des impacts environnementaux d'un produit peut s'effectuer par une méthode globale qui tient compte du cycle de vie complet du produit. Elle doit se faire en prenant en compte toutes les étapes du produit à partir de l'extraction des ressources et de la fabrication des matières premières, en passant par les fabrications secondaires, jusqu'à l'utilisation, l'entretien et la fin de vie.

V.2 Analyse du cycle de vie des vitrages optimaux pour la bande côtière du Bénin

Pour faire cette analyse de cycle de vie, nous allons d'abord préciser le champ d'étude

V.2.1 Champ de l'étude

L'énergie de cycle de vie d'un produit est définie comme le total des apports d'énergie indispensable durant tout le cycle de vie.



Figure 5.1 : Cycle de vie d'un produit

Elle comprend :

- L'énergie d'extraction et du transport des matières premières
- L'énergie nécessaire à la transformation des matières premières et la fabrication du produit
- L'énergie découlant de son exploitation, sa mise en œuvre
- Celle de sa fin de vie : incinération /recyclage/mise en décharge

L'énergie de la fin de vie ne sera pas prise en compte dans nos études, le Bénin ne disposant pas de centre d'incinération ou de recyclage de ces vitres. Cependant, nous allons considérer qu'en fin de vie du bâtiment, les vitrages seront ramenés en Belgique

V.2.2 Différentes étapes de fabrication du vitrage simple clair float 4mm

Les ressources nécessaires pour fabriquer le vitrage simple sont :

- La silice, introduit sous forme de sable (environ 72%)
- D'un fondant, la soude, sous forme de carbonate et sulfate (environ 14%)
- De la chaux sous forme de calcaire (environ 10%)
- Différents autres oxydes comme l'alumine, la magnésie etc...,
- Du verre cassé (calcin)

Après obtention des ressources nécessaires, la fabrication du vitrage clair simple float proprement dit passe par 5 étapes (figure 5.2). Ce sont :

- Approvisionnement en continu
- Fusion des matières premières à des températures avoisinant 1550°C, affinage et conditionnement thermique
- Bain d'étain (la masse fondue coule sur un bain d'étain en fusion à 1000°C environ. Les faces du verre sont polies par la surface de l'étain d'une part et par le feu d'autre part
- Refroidissement sans polissage ultérieur
- Découpe.



Figure 5.2 : fabrication du verre FLOAT clair 4mm

V.3 Evaluation de l'énergie grise du vitrage du bâtiment

En considérant les résultats obtenus au chapitre 4, le simple vitrage 4mm paraît énergétiquement plus performant que le double vitrage 4/16/4 pour des consignes du climatiseur se trouvant en dehors de la zone de confort commune aux deux climats (voir chapitres 2 et 4). Nous nous proposons de faire ici une analyse environnementale de ces deux vitrages en considérant l'utilisation d'un climatiseur qui régule à 30°C la température à l'intérieur de l'immeuble et à 58% l'humidité relative.

V.3.1 Vitrage simple float clair 4mm

Le verre plat 4mm considéré dans nos travaux est celui produit par SGG PLANILUX, SGG PLANITHERM et SGG COOL-LITE (voir fiche de déclaration environnemental en annexe. L'unité fonctionnelle est de 1m². La durée de vie considérée est de 30ans.

L'énergie grise comme nous l'avons spécifiée ci-dessus est la somme de l'énergie grise initiale globale et de celle de l'énergie grise liée à l'utilisation du vitrage dans le bâtiment. En appliquant au vitrage le modèle du calcul du bilan énergétique de bâtiment développé dans le logiciel PHPP (Passihaus Projectierungs Paket) et repris par Emmanuelle ROTA et Benoît QUEVRIN dans BeGlobal [83], on pourra écrire les équations suivantes :

$$E_{I,GV} = E_{F,vit} + E_{T,vit} \quad (5-1)$$

$E_{F,vit}$: Energie de fabrication du vitrage clair

$E_{I,GV}$: Energie initiale globale

$E_{T,vit}$: Energie de transport du vitrage

L'énergie de fabrication est l'énergie primaire totale qui est représentée ci-dessous

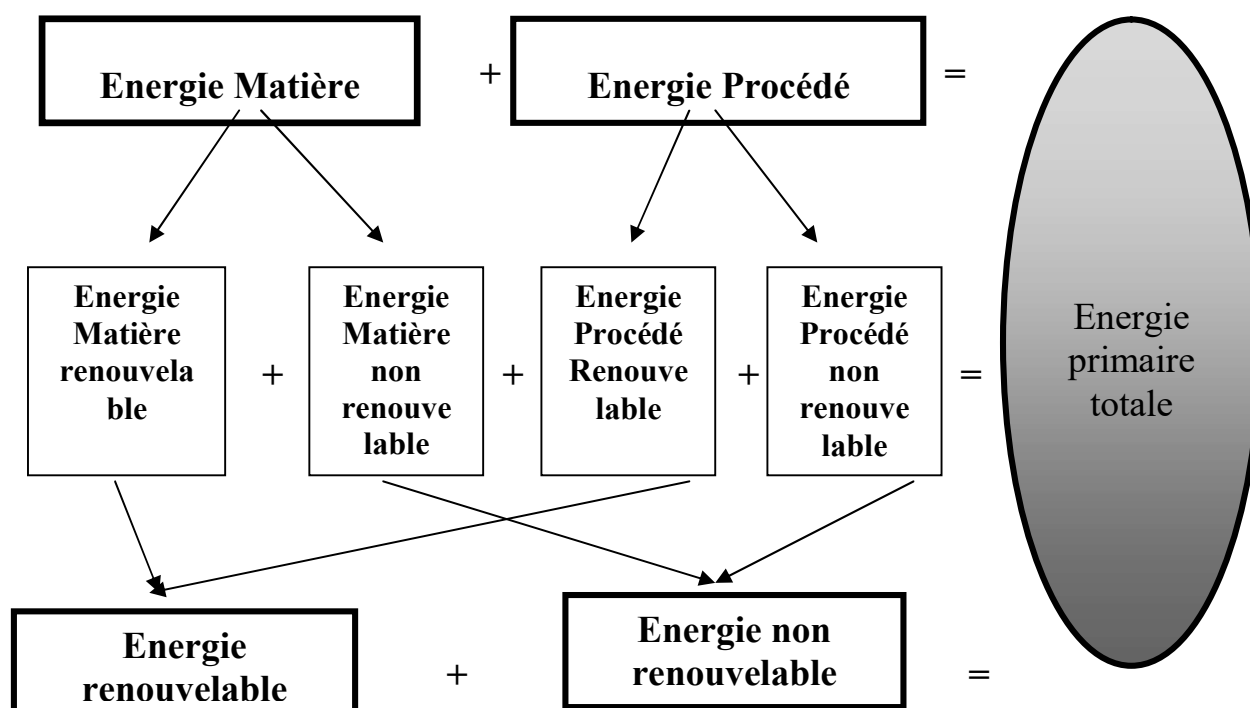


Figure 5.3 : Décomposition de l'énergie primaire totale

La fiche de déclaration environnementale SGG PLANILUX, SGG PLANITHERM & SGG COOL-LITE (SAINT GOBAIN) voir annexe nous a permis d'établir le tableau suivant :

Tableau 5.1 : Consommation en Energie durant la phase de fabrication

	Unité	Total pour une durée de vie de 30 ans
Energie renouvelable	MJ	3.84
Energie non renouvelable	MJ	158
Energie primaire totale	MJ	161.84

Tableau 5.2: Données unitaires au sens de la norme NFP01-010 comme étape de cycle de vie du lieu de production au lieu de mise en œuvre

	Transport par camion	Transport par bateau
Energie (MJ)	0.7326	0.1052
GES(Kgeq CO2)	0.0584	0.0079
Trajet (km)	45	4991

L'énergie primaire totale ou l'énergie de fabrication de 1m² de verre plat pour vitrage clair 4mm est ici de 161.84 MJ. La surface totale vitrée pour l'immeuble étant

$$S = ((50.25+22.39+8) + (46.79+2.04))m^2 \text{ soit}$$

\longleftrightarrow
Rez de chaussée

\longleftrightarrow
Etage

$S = 129m^2$, il en vient alors que

$$E_{F,vit} = \frac{161.84MJ * 129}{1} = 20877.36MJ \text{ soit } 5799.266kWh$$

En supposant que le transport des vitrages se fait de la société St GOBAIN de Bruxelles à Cotonou, le trajet sera composé d'une partie par camion et d'une autre par bateau.

Rappelons que la distance séparant le port d'Anvers de Bruxelles est de 45km et celle du port d'Anvers de celui de Cotonou est d'environ 4991km. Le tableau 5-2, présentant les données unitaires pour une tonne sur 1km selon la norme NFP01-010, va nous servir d'épine dorsale pour le bilan énergétique et celui du gaz à effet de serre

1kg de verre plat 4mm servant pour un clos de 0.1m² [84], alors pour tout l'immeuble soit pour 129m² de clos, on aura une masse totale de 1290kg, soit 1.290 tonnes de verre plat 4mm.

Par conséquent, en utilisant les données du tableau 5.2, on obtient :

$$E_{T,vit} = ((0.7326MJ * 45km) + (0.105MJ * 4991km)) * 1.290T = 557.015MJ * 1.29T = 199.03kWh$$

On obtient alors pour énergie globale initiale:

$$E_{I,GV} = E_{F,vit} + E_{T,vit} = 5799.266kWh + 199.03kWh = 5998.304kWh$$

En considérant que la mise en œuvre de ce vitrage dans le bâtiment et son entretien ne consomme pratiquement pas d'énergie,

le bilan énergétique global sera donné par la relation (2) :

$$B_{E,G} = E_{I,G} + E_{U,G} + E_{E,G} \quad (2)$$

$B_{E,G}$: Bilan énergétique global

$E_{I,G}$: Energie initiale globale

$E_{U,G}$: Energie d'utilisation globale

$E_{E,G}$: Energie d'élimination

L'énergie globale d'utilisation pendant la durée de vie du bâtiment sera alors :

$$B_{E,G} = 5998.30 kWh + 199.03 kWh = 6197.33 kWh$$

Par conséquent l'énergie grise de ce vitrage est alors

$$E_{grise} = \frac{6197.33 kWh}{129} = 48.041 kWh/m^2$$

V.3.2. Double vitrage 4/16/4

Pour le double vitrage, nous avons utilisé, celui de SGG CLIMAPLUS de Saint Gobain. Ce double vitrage est à basse émissivité. L'unité fonctionnelle est de $1m^2$ et destiné à être intégré dans une menuiserie pour un bâtiment pendant une annuité, sur la base d'une durée de vie de 30ans. Ce double vitrage est composé de 2 vitres SGG PLANILUX et SGG PLANITHERM (voir fiche de déclaration en annexe) (verre revêtu d'une couche à faible émissivité. Les deux vitres sont séparés par un intercalaire de 18mm d'épaisseur, en aluminium ou en plastique composite. L'espace est rempli d'argon. Le coefficient de transmission thermique U_g est de $1W/m^2.K$ pour une transmission lumineuse TL comprise entre 71% et 80% et un facteur solaire g compris entre 40% et 64%.

Tableau 5-3 : Ressources énergétiques

Type	Unités	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle	Valeur de l'indicateur pour toute la durée de vie (30ans)
Energie Primaire totale	MJ	16.1	484
Energie Renouvelable	MJ	0.691	20.7
Energie non renouvelable	MJ	15.4	463
Energie Procédé	MJ	15.2	457

Tableau 5-4 : Constituant de l’emballage de l’unité fonctionnelle

Constituants de l'unité fonctionnelle	Masse dans l’unité fonctionnelle sur une annuité (kg)	Masse dans l’unité fonctionnelle pour toute la durée de vie (30) ans (kg)
Métal	$6.33 \cdot 10^{-5}$	0.0019
Carton d’emballage	$3.9 \cdot 10^{-4}$	0.0117
Poudre intercalaire	$1.67 \cdot 10^{-5}$	0.0005
Matières plastiques	$7.67 \cdot 10^{-4}$	0.023
Bois	$1.17 \cdot 10^{-3}$	0.035
Double vitrage proprement dit	0.067	20.12
TOTAL		20.19

$$E_{F,vit} = 484MJ * 129 = 62436kWh \text{ (durant les 30ans de durée de vie).}$$

Par conséquent, en utilisant les données du tableau 5.2, on obtient :

$$E_{T,vit} = ((0.7326MJ * 45km) + (0.105MJ * 4991km)) * 557.015MJ * 129m^2 * 20.19Kg * 0.001 = 557.015 * 2.604MJ = 401.85kWh$$

$$\text{Soit } E_{T,vit} = 401.85kWh$$

L’énergie globale initiale vaudra alors :

$$E_{I,GV} = 62436 kWh + 401.85kWh = 62837.85kWh$$

L’énergie globale d’utilisation pendant la durée de vie du bâtiment sera alors :

$$B_{E,G} = 62837.85kWh + 401.85kWh = 63239.70kWh$$

Par conséquent l’énergie de cycle de vie de ce vitrage est alors

$$E_{grise} = \frac{63239.70kWh}{129} = 490.23kWh/m^2 \text{ avec } E_{grise} \text{ l’énergie de cycle de vien}$$

V.4 Bilan global des émissions de gaz à effet de serre

V.4.1 Simple vitrage

En général, le vitrage d’un bâtiment émet en général une quantité relativement importante de gaz à effet de serre, notamment du dioxyde de carbone (CO2). Le bilan global des émissions de gaz à effet de serre a pris en compte les émissions de gaz à effet de serre durant la phase de production du vitrage, de

son transport au Bénin et de son utilisation pendant toute la durée de vie du bâtiment.

Selon la relation [Emmanuelle ROTA, Benoît QUEVRIN, 2012] on peut écrire :

$$B_{G,GES} = GES_{I,G} + GES_{U,G} \quad (3)$$

Où

$B_{G,GES}$: Bilan global des émissions de gaz à effet de serre du vitrage [kg EqCO₂]

$GES_{I,G}$: Emission de gaz à effet de serre initiale globale [kgEqCO₂]

$GES_{U,G}$: Emissions de gaz à effet de serre d'utilisation globales [kg EqCO₂]

$$GES_{I,G} = GES_{F,mat} + GES_{T,mat} \quad (4)$$

où :

$GES_{F,mat}$: Emission de gaz à effet de serre de fabrication du vitrage

$GES_{T,mat}$: Emission de gaz à effet de serre de transport du vitrage au Bénin

Les émissions de gaz à effet de serre de fabrication entraînant un réchauffement climatique pour 1m² de verre float 4mm étant de 11.5kgCO₂eq (voir fiche de déclaration en annexe), les émissions de gaz à effet de serre de fabrication valent:

$$GES_{F,mat} = 11.5KgCO_2eq \times \frac{129m^2}{1} = 1483.5KgCO_2eq$$

En utilisant les données du tableau 5.2, on pourra calculer l'émission de gaz à effet de serre durant le transport de Bruxelles au Bénin.

$$GES_{T,mat} = (0.0584kgCO_2eq * 45km + 0.0079kgCO_2eq * 4991km) * 1.29tonne \\ = 54.25kgCO_2eq$$

$$GES_{I,G} = GES_{F,mat} + GES_{T,mat} = (1483.5 + 54.25)kgCO_2eq = 1537.75kgCO_2eq$$

Le bilan global d'émission à effet de serre du simple vitrage durant 30ans d'usage du bâtiment sera :

$$B_{G,GES} = (1537.75 + 54.25)kgCO_2 = 1592 kgCO_2eq$$

V.4.2 Double vitrage 4/16/4

Les émissions de gaz à effet de serre de fabrication entraînant un réchauffement climatique pour 1m² Du double vitrage 4/16/4 ‘‘SGG CLIMAPLUS’’ étant de 31.4kgCO₂eq (voir fiche de déclaration en annexe), les émissions de gaz à effet de serre de fabrication valent:

$$GES_{F,mat} = 31.4KgCO_2eq \times \frac{129m^2}{1} = 4050.6KgCO_2eq$$

En utilisant les données du tableau 5.2, l’émission de gaz à effet de serre durant le transport de Bruxelles au Bénin sera :

$$GES_{T,mat} = (0.0584kgCO_2eq * 45km * (20.19 * 0.129) + 0.0079kgCO_2eq * 4991km) * 20.19 * 0.129$$

$$= 109.53kgCO_2eq$$

Par conséquent, l’émission de gaz à effet de serre globale initiale vaudra :

$$GES_{I,G} = GES_{F,mat} + GES_{T,mat} = (4050.6 + 109.53)kgCO_2eq = 4160.13kgCO_2eq$$

Le bilan global d’émission à effet de serre du simple vitrage durant 40ans d’usage du bâtiment sera :

$$B_{G,GES} = (4160.13 + 109.53)kgCO_2 = 4269.66kgCO_2eq$$

• Récapitulons

Tableau 5-5 : Récapitulatif des impacts

Catégorie d'impact	Unité	4 (float clair)	4/16/4
consommation d'eau	litres	103	244
Energie grise	kWh/m²	48.041	490.23
Déchets dangereux	kg	0.044	0.381
Déchets non dangereux	kg	0.005915	1.05
Déchets radioactifs	kg	0.00053	0.00182
Déchets inertes	kg	0.496	20.1
Déchets valorisés	kg		1.095
Pollution de l'air	m ³	1302	3992
Pollution de l'eau	m ³	5.65	9.78
changement climatique	kg CO₂ eq	1592	4269.66
Epuisement des	kgSb eq	0.0648	0.190

Catégorie d'impact	Unité	4 (float clair)	4/16/4
ressources			
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kgCFC-11 eq	1.23E-10	3.38E-10
Acidification	kgSO ₂		0.203
formation d'ozone photochimique	kgC ₂ H ₄	0.00257	0.0105
Eutrophisation	kgPO ₄ ³⁻	6.22	14.1

Les impacts sont plus élevés avec le double vitrage que le simple vitrage. Par conséquent du point de vue environnemental, le simple vitrage paraît plus durable. Ceci s'explique par les valeurs élevées de l'énergie grise et du changement climatique du fait de la consommation énergétique plus élevée dans le cas du double par rapport au simple vitrage.

V.6 Conclusions et Recommandations

Tableau 5-7 : energie de cycle de vie et changement climatique pour les différents types de vitrages retenus

	Unité	(Simple vitrage) 4mm		Double vitrage 4/16/4	
Catégorie d'impact		Ta=25°C et RH=68%	Ta=29°C et RH=63%	Ta=25°C et RH=68%	Ta=29°C et RH=63%
Energie grise	kWh/m ²	24605.89	6221.46	24584.54	12162.84
changement climatique	kg CO ₂ eq	953706.83	240051.65	948463.14	468656.63

- En climatisation active dans la bande côtière du Bénin, le double vitrage serait plus performant que le simple vitrage pour des températures de climatisation comprises entre 24°C et 25°C.
- Par contre pour une température élevée, le simple vitrage est mieux indiqué par rapport au double vitrage pour une demande énergétique du bâtiment plus basse. Il est important de remarquer que les demandes énergétiques pour des consignes de températures comprises entre 24°C et 25°C sont très peu différentes l'une de l'autre pour les deux types de

vitrage, cependant nous tenons à mettre en exergue cette différence de performance car elle pourra permettre de faire une économie d'échelle en matière de consommation d'énergie.

- Une utilisation à tort du double vitrage ou du simple vitrage dans les bâtiments administratifs de la bande côtière du Bénin, détruirait davantage l'environnement, l'émanation des polluants qui contribuent au changement climatique étant fortement dépendante ici de l'énergie d'utilisation des vitrages.
- En définitive, en climat chaud et humide de la bande côtière du Bénin, l'impact environnemental des bâtiments entièrement vitrés, dépend de la température de consigne du climatiseur ; ce qui doit orienter le choix du vitrage à mettre en œuvre pour une amélioration des conditions de confort thermique dans cette région.

Nous recommandons alors :

- L'érection des bâtiments à fenestration en vitre dans la bande côtière du Bénin doit faire l'objet d'une étude approfondie afin de déterminer les consignes de régulation des climatiseurs à mettre en œuvre pour choisir le type de vitrage adéquat qui permet une économie d'énergie et par conséquent le respect de l'environnement.
- Qu'il faut penser à l'équipement de tout bâtiment à fenestration d'un système autonome de production d'énergie renouvelable (exemple le solaire photovoltaïque) pour décharger au mieux le réseau national de transport d'énergie

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

VI.1 Conclusion générale

L'objet de ce travail consistait en l'évaluation de la performance énergétique et sur le plan du confort de bâtiments vitrés dans la bande côtière du Bénin. Cette région, située au sud du Bénin, se caractérise par un climat de type tropical, chaud et humide. L'étude de la performance énergétique de ces bâtiments a été décomposée en trois phases: une phase de mesure in situ, une phase de modélisation mathématique du confort thermique et une phase de simulation numérique.

Dans un premier temps, la sensation de confort thermique dans les bâtiments administratifs vitrés de l'Université d'Abomey Calavi a été évaluée à l'aide du modèle de FANGER, à partir des mesures in situ des paramètres d'ambiance que sont la température de l'air ambiant, l'humidité relative, la température moyenne radiante des parois, l'habillement et le métabolisme des occupants. Ce calcul ne tient pas compte de la sensation réelle de confort exprimée par les occupants. Les bâtiments étant climatisés, les résultats obtenus sont compatibles avec la zone de confort relevée sur le diagramme de GIVONI pour les climats chauds et humides.

Parallèlement aux mesures in situ des paramètres d'ambiance, une seconde étude réalisée au moyen d'un questionnaire a porté sur l'évaluation de la perception du confort thermique auprès de 750 étudiants. Les résultats de cette étude ne sont pas en accord avec les résultats du modèle de FANGER. En modifiant la formule du vote moyen prévisible de FANGER (de façon à l'adapter au climat de la bande côtière du Bénin), nous avons pu obtenir une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux des 750 participants et les résultats théoriques. Des mesures faites in situ, il ressort que l'humidité relative dans cette région du Bénin est linéairement corrélée à la sensation de confort thermique exprimée par les participants. Cette corrélation a été confirmée par la simulation thermique d'un bâtiment test en comparant les évolutions dynamiques de la température, de l'humidité relative et du PMV de

FANGER corrigé. En effet, la bande côtière du Bénin étant caractérisée par une très faible différence de température de l'air ambiant entre le jour et la nuit, nous avons montré que dans cette région le niveau de confort thermique dépend essentiellement de l'humidité relative de l'air (pour une vitesse de l'air faible et variant très peu, un facteur d'habillement d'été et une activité administrative, ainsi qu'une température de paroi égale à la température de l'air ambiant). Mieux, il semble que l'acceptation des températures élevées par rapport aux températures basses par les africains soit liée aux nuances ethniques de la peau noire.

Une zone de confort sensiblement différente de celle de l'Europe a de cette façon pu être identifiée sur un diagramme (température, humidité relative). Dans ce diagramme, on note une zone de confort commune aux deux types de climat (le climat tempéré et celui de la bande côtière du Bénin) dans laquelle le modèle de FANGER est applicable. Cette zone commune permet d'établir les conditions hygrothermiques de travail qui favorisent la collaboration entre travailleurs administratifs béninois originaires de cette région et expatriés européens à Cotonou, une ville située dans la bande côtière du Bénin, dans un souci de convivialité et d'économie d'énergie.

L'utilisation de l'approche de FANGER corrigée que nous proposons rend mieux compte des sensations thermiques dans les bâtiments administratifs de cette région. L'aspect adaptatif du confort thermique reste néanmoins important. Une première tentative de la prise en compte de cet aspect a donc été faite, tout en conservant une approche systémique du confort pour mettre en exergue la complémentarité entre les deux approches. L'introduction du caractère adaptatif en tant que complément de l'approche de FANGER doit permettre d'améliorer le confort thermique et de rendre la stratégie d'économie d'énergie très efficace dans cette région.

En procédant de cette façon, on obtient un système résultant qui, contrairement à l'approche de FANGER, n'est pas stationnaire. Le caractère dynamique de

l'approche adaptative traduit l'adaptation au cours du temps du corps humain aux contraintes thermiques. Ceci étant, il se pose la question de la façon dont sera mise en exergue la complémentarité de cette approche adaptative avec celle de l'approche de FANGER ou de celle de GAGGE qui, toutes deux sont des approches basées sur un bilan thermique de l'occupant.

Dans cette thèse, la mise en exergue de cette complémentarité a été faite tout en ramenant l'effet adaptatif à l'action d'un contrôleur proportionnel qui agirait par le biais d'un feed-back ou rétrocontrôle, pour rétablir le confort souhaité en cas de rupture. Cependant, modéliser mathématiquement l'effet adaptatif paraît quelque peu grossier, étant donné que l'adaptation ne pourrait être quantifiée de manière précise ou exacte pour être enfermée dans un modèle mathématique. Elle varie selon l'individu et relève sérieusement de l'imprécision (adaptation psychologique par exemple). C'est d'ailleurs en cela que réside la subjectivité et la complexité du concept de confort thermique dans les bâtiments ! Ne serait on pas alors en conformité avec la réalité en exprimant cette imprécision ou ce caractère vague de l'adaptation par une approche de logique floue ? Ceci constitue une perspective offerte par cette thèse.

La thèse s'est également penchée sur l'optimisation multicritère du vitrage pour le contexte particulier de la bande côtière du Bénin. Parmi les vitrages utilisés, en ne se tenant qu'à l'adaptation du PMV de FANGER à cette région, le simple vitrage 4mm paraît plus adapté, malgré son facteur solaire plus élevé). Evidemment, tous les simples vitrages testés ont presque une même valeur de U de transmission ou de déperdition de chaleur vers l'extérieur. Par conséquent le facteur solaire devient ici l'élément déterminant pour le choix de la solution optimale. Le facteur discriminant du confort dans cette région étant l'humidité relative, il va de soi qu'une diminution de l'humidité relative améliore le confort. En effet, une augmentation de la température entraînerait selon le diagramme psychrométrique une diminution de l'humidité relative. Par

conséquent, le vitrage simple 4mm qui a un facteur solaire élevé est plus confortable que tous les autres testés. Cependant, il importe de tenir compte du coefficient de transmission thermique U et de la surface à vitrer pour choisir le meilleur vitrage simple à mettre œuvre sur un bâtiment donné. Dans le cas du double vitrage, seule la valeur de U suffit pour opérer un choix de vitrage parmi plusieurs.

Par conséquent, parmi les vitrages testés, le double vitrage 4/16/4 ayant pour caractéristiques thermique (0.81W/K.m^2 ; 0.632) est le mieux adapté pour l'immeuble étudié. Cependant le taux d'inconfort, que génère l'utilisation de ce double vitrage dans le bâtiment test, est aussi élevé. Dès lors, des stratégies d'amélioration du confort ont été envisagées. Les plus prometteuses sont celles qui associent la combinaison d'un ombrage et d'une ventilation avec une vitesse élevée de l'air ambiant, l'ombrage seul n'étant pas efficace, puisque ne permettant pas de déshumidifier l'ambiance. De la même manière, la ventilation seule n'améliore pas non plus le confort thermique des bâtiments administratifs vitrés dans la bande côtière du Bénin. Evidemment, l'ombrage ne permettant pas la montée en température de l'ambiance intérieure des bâtiments, une combinaison de cette stratégie avec la ventilation aurait pu améliorer le confort thermique. Malheureusement, l'humidité de l'air très élevée et frôlant parfois la saturation dans cette région et la limitation de la vitesse de l'air ambiant à l'intérieur des bâtiments administratifs, les faiblesses et la limite de la mise en œuvre de cette stratégie dans les bâtiments administratifs ont vite fait de s'imposer à nous.

En conclusion l'utilisation de vitrage dans la bande côtière du Bénin nécessite une climatisation active et de ce fait une dépense d'énergie supplémentaire. Dans cet ordre d'idée, pour atteindre une performance énergétique et environnementale du bâtiment, le choix des consignes du climatiseur doit tenir compte du type de vitrage utilisé. Ainsi, les différentes simulations nous ont montré que pour des consignes de régulation du climatiseur se trouvant dans la

zone commune de confort au climat de la bande côtière du Bénin et à celle des régions tempérées, le double vitrage est plus performant, tandis que pour des consignes de régulation du climatiseur, en dehors de cette zone, le simple vitrage devient le plus performant.

Pour terminer nous recommandons que la construction de tout immeuble vitré dans la bande côtière du Bénin fasse l'objet d'une étude approfondie ayant pour buts :

- De déterminer les consignes de régulation des climatiseurs à mettre en œuvre afin de choisir le type de vitrage adéquat qui permette une économie d'énergie et par conséquent le respect de l'environnement ;
- D'équiper le bâtiment d'un système autonome de production d'énergie renouvelable (exemple le solaire photovoltaïque) et une climatisation thermique pour décharger au mieux le réseau national de transport d'énergie.

VI.2 Perspectives

Dans le contexte actuel de crise énergétique, la performance énergétique constitue un atout des bâtiments. Une bonne maîtrise et compréhension de la sensation thermique est et doit rester une préoccupation majeure des chercheurs dans le domaine de la thermique du bâtiment, pour assurer une transition énergétique réussie. Celle-ci passe irrémédiablement par l'efficacité énergétique. Partant de là, tout travail allant dans le sens d'une meilleure compréhension du confort thermique dans le bâtiment reste déterminant pour les actions futures en vue d'un changement de comportement visant l'efficacité énergétique des bâtiments où le vitrage est prépondérant. Pour cela, il nous semble qu'une amélioration de l'actuelle adaptation du modèle de FANGER est possible. Nous proposons alors de :

- Multiplier les campagnes de mesures dans la bande côtière du Bénin pour le recalage du coefficient correctif du Modèle de FANGER et étudier son extension aux villes comme Lomé, Lagos, Accra, Abidjan, Monrovia, Freetown, Conakry et Bissau
- Etudier l'impact de la différence entre les températures ambiantes et celles moyennes radiantes
- Vérifier l'applicabilité du modèle de GRIFFITHS de coefficient 0.6 dans ces villes
- Approfondir la notion de complémentarité des approches de FANGER et celle du confort adaptatif et étudier l'apport du contrôle flou dans la thématique du confort thermique des bâtiments.
- Etudier l'éventualité d'une ventilation naturelle pour l'amélioration du confort dans cette région.
- Tester l'apport des vitrages électrochromes sur le bâtiment test.
- Proposez le dimensionnement d' une climatisation solaire thermique ou photovoltaïque pour ce bâtiment test
- L'humidité relative étant le facteur discriminant du confort thermique dans cette région, il serait très intéressant de vérifier si le contrôle de l'humidité relative n'est - il pas suffisant pour une climatisation efficace des bâtiments dans cette région.

Références

1. Dreyfus J: Confort dans l'habitat en pays tropical, Edition Eyrolles, 350p, Paris 1960
2. N'GESSAN M'Gbra. Thèse pour l'obtention du grade de docteur. Centre expérimental de Recherches d'études du bâtiment et des travaux publics. 9février 1990.
3. Y. Jannot et T. Djiako. Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropical. Département Energies pour le développement rural, Ecole Inter – états d'ingénieurs de l'équipement rural (E.I.E.R)
4. OLANIKPEKUN Emmanuel Abiodun. Examination of thermal comfort in a naturally ventilated hostel using PMV-PPD model and field survey. American Journal of Engineering Research (AJER) 2014 Volume-3, Issue – 8, pp-63-78
5. Mike Adebamowo and Olumide Olusanya. Energy savings in housing through enlightened occupant behavior and by breaking barriers to comfort:- A case study of Hostel design Nigeria. Proceedings of 7th Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world Cumberland Lodge, Windsor, UK 12-14 April 2012, London Network for Comfort and Energy Use in Building.
6. A. Kemajou, A. Tseuyep et N.E.Egbewatt.' Le confort thermique en climat tropical humide vers un réaménagement des normes ergonomiques. Revue des Energies Renouvelables Vol. 15N°3(2012) 427-438
7. Simons Barbara, Koranteng Christian and Woanyah-Deladem Sandra. Thermal comfort evaluation of high-rise building in Accra, Ghana.

- Pelgia Research Library. *Advances in Applied Science Research*, 2012, 3(1): 502-507 ISSN: 0976-8610 CODEN (USA): AASRFC
8. Abel Tablada, Ana M. De la Pena and Frank De Troyer. Thermal Comfort of Naturally Ventilated Buildings in warm-Humid Climates: field survey. The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Beirut, Lebanon, 13-16 November 2005
 9. Fanger P.O. Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970
 10. Rajasekar E. and A.Ramachandraiah. Adaptive comfort and thermal expectations- a subjective evaluation in hot humid climate. Proceeding of conference: Adaptive to change; New Thinking on comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK 9-11 April 2010. London
 11. Fergus Nicol. Adaptive thermal comfort standards in the hot – humid tropics. *Energy and Buildings* 36 (2004) 628 – 637
 12. J.C. Deval. Le confort thermique en climat tempéré. *Revue physique Appliquée* 19(1984) , pages 513-531
 13. C.P. Yaglou, A method for Improving the effective temperature index, *ASH&VE TRANSACTIONS*, vol – 53, pp 307-326, 1947
 14. A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk and J.F. Hardy, comfort and thermal sensation and associated physiological responses at various ambient temperatures, *Environmental research*, 1: 1-20, 1967
 15. Doris Hooi chye Toe, Tetsu Kubota. Development of an Adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot humid climates using ASHRAE RP-884. *Frontier of Architectural Research*, volume 2, Issue 3 september 2013, pages 278-291
 16. CHAFFA Gédéon. Contribution à la conception bioclimatique des habitations dans la région du Sud du Bénin. Thèse de doctorat, UAC, BENIN

17. Cossi Norbert AWANOU, Etude de réfrigération passive par toiture diode. Thèse du doctorat du troisième cycle 1985. Université de Nice
18. Aurélien OLISSAN, Clément KOUCHADE, Philippe ANDRE, Cossi Norbert AWANOU: Le confort thermique des bâtiments en région tropicale. Cas de quelques bureaux du rectorat de l'Université d'Abomey Calavi : Actes CIFEM 2012-Art-13-53
19. Olesen BW, Pearsons KC. Introduction to thermal standards and to the proposed new version of En ISO 7730 1981
20. GRET; Groupe de Recherche et d'Echange Technologique. Etude Préliminaire d'adaptation au changement climatique en Afrique (Contribution au projet Négociation Climat pour toute l'Afrique Réussie (NECTAR). Juillet 2009
21. J. Classens, E. Huylebroeck, Jose Flemal. Sensibiliser à la problématique de la climatisation. Guide pour une expertise "climatisation" Approche Syndicale BRISE 2007
22. THERMAL COMFORT by B.W. Olesen Ph.D
23. Ogbona, AC, Harris Dj. Thermal comfort in Sub –Sahara Africa: field study report in Jos-Nigeria Appl Energy 2008, 85:1-11
24. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). 1992). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ASHRAE Standard 55-1992)
25. Arens, E., Xu, T., Miura, K. Hui, Z., Fountain, M., & Bauman, F.S.(1998). A study of occupant cooling by personally controlled air movement. Energy and Buildings, 27, 45-59
26. Auliciems, A. (19981). Towards a psycho-physiological model of thermal perception. International Journal of Biometeorology, 25, 109-122
27. Auliciems, A. & de Dear, R.(1986). Air conditioning in Australia: Human thermal factors. Architectural Science Review, 29, 67

28. Doherty, T.J.& Arens, E. (1988). Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models ASHRAE Transactions, 94(1), 1371-1385
29. E. Rajasekar and A.Ramachandraiah. Adaptative comfort and thermal expectations- a subjective evaluation in hot humid climat. Proceeding of conference: Adaptative to change; New Thinking on comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK 9-11 April 2010. London
30. Aurélien OLISSAN, Clément KOUCHADE, Philippe ANDRE, Cossi Norbert AWANOU: Le confort thermique des bâtiments en région tropicale. Application du modèle de FANGER des laboratoires de l'Université d'Abomey Calavi : Actes SFT 2013- Poster
31. ujf-grenoble.fr/tice-espace/GC/thermique/chapA/0schap/confort.pdf
32. M. Santamouris. Adaptive thermal comfort and ventilation. Air infiltration and ventilation centre. Ventilation Information. Paper n° 12 June 2006
33. Alexis Kemadjou; Les systemes de ventilation et de climatisation. Fiche technique du Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Energie-IEPF (Institut de la Francophonie. www.ifdd francophone.org/docs/prisme/climatisation
34. B. Givoni, Comfort, climate analysis and building design guidelines, Energy Build,18(1) (1992) 11-23
35. C. Flagothier, C. Piérard- Franchimont, G.E. Piérard. La peau et ses nuances ethniques. Revue Med Liege 2005; 60: Sup, I: 53-56
36. M. L. Thomson. A comparison between the number and distribution of functioning eccrine sweat glands in Europeans and Africans. J. Phisiol (1954) 123, 225-233
37. Taketsugu Tadokoro, Nobuhiko Kobayashi, Barbara Z. Zmudzka,Vincent J. Hearing. U-V- Induced DNA damage and melanin

- content in human skin differing in racial/ ethnic origin. The FASEB Journal express article 10.1096/fje. Published online April 8, 2003
38. PO Fanger and J. Toftum. Prediction of thermal sensation in non –air conditioned buildings in warm climates. International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark
 39. Anh Tuan Nguyen, Manoj Kumar Singh, Sigrid Reiter. An adaptive thermal comfort model for humid South-East Asia. Building and Environment 56 (2012) 291-300
 40. Wagner Augusto Andreasi and Roberto Lamberts. Thermal comfort in buildings located in regions of hot and humid climate of Brazil
 41. Runming Yao, Baizhan Li, Jing Liu. A theoretical adaptive model of thermal comfort-Adaptive Predicted Mean (aPMV). Building and Environment 44(2009) 2089-2096
 42. Hoppe, P. (2002), Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort energy and Buildings. Vol. 34, pp.53-62.
 43. Cossi Norbert AWANOU, Etude de réfrigération passive par toiture diode. Thèse en vue de l'obtention du doctorat du troisième cycle
 44. J. Classens, E. Huylebroeck, Jose Flemal. Sensibiliser à la problématique de la climatisation. Guide pour une expertise ‘‘climatisation’’ Approche Syndicale BRISE 2007
 45. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). 1992). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ASHRAE Standard 55-1992)
 46. Baille, A.P., Griffiths, I.D. & Huber, J. W. (1987). Thermal Comfort Assessment: Anew Approach to comfort Criteria in Buildings. 5Report to ETSU S- 1177). Guildford, UK: University of Survey
 47. Baker,N., & Standeven, M.(1996). Thermal comfort for free – running buildings. Energy and Buildings, 23(3), 175-182

48. Hien, W.N. and TANAMAS, J. 2002. The effect of wind on thermal comfort in the tropical environment. In Proceedings of the International
49. Mallick, F.H. 1994. Thermal comfort in tropical climates. An Investigation of comfort criteria in Bangladesch subjects. Proc conf. PLEA. 1994, Israel
50. Bellayat, E.K, Nicol, J.F. and Wilson, M., 2002. Thermal comfort in Algeria. Preliminary Results of field studies. Proc. Epic 2002 Conference Lyon
51. Auliciems, A. (1977). Thermal comfort criteria for indoor design temperatures in the Australian winter. Architectural Science Review, 29, 67-75
52. Brager, G.S., Fountain, M.E., Benton, C.C., Arens, E. A., & Bauman, F.S. (1994). A comparison of methods for assessing thermal sensation and acceptability in the field. In N. A. Oseland & M.A. Humphreys (Eds), Thermal Comfort: Past, Present and Future (pp. 17-39), Garston UK: Building Research Establishment
53. Busch, J.F. (1992). A tale of two populations: Thermal comfort in air – conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. Energy and Buildings, 18, 235-249
54. Cena & de Dear, R. (2001). Thermal comfort and behavioural strategies in office buildings located in a hot-arid climate. Journal of thermal Biology, 26(4), 409-414.
55. Cena, K.M., Spotila, J. R. & Ryan, E. B. (1998). Effect of behavioural strategies and activity on thermal comfort of the elderly. ASHRAE Transactions, 94(1), 83-103.
56. Croome, D.J., Gan, G., & Awbi, H.B. (1992). Air flow and thermal comfort in naturally ventilated offices. Roomvent'92-Aalborg, Danemark (pp. 401-417)

57. Boudan, C. and Ghrab N., 2001. Thermal comfort in Tunisia, results of a one year survey. Proc. Conf. Moving thermal comfort standards into the 21st century, Windsor, UK, 197-206
58. Feriadi, H, 2002a. Thermal Comfort for naturally ventilated houses in Indonesia-Int symposium Buiding Research and sustainability of the Build Environment in the tropics, 14-16 october, Jakarta
59. Feriadi H. 2002b. Natural ventilation via courtyard for tropical buildings. Int Symposium Building Research and sustainability of the Build Environment in the tropics, 14-16 october, Jakarta
60. De Dear, R. J., & Auliciems, A. (1985). Validation of predicted mean vote model of thermal comfort in six Australian field studies. ASHRAE Transactions, 91(2), 452-468
61. De Dear, R.J., Leow, K.G., & Ameen, A. (1991). Thermal comfort in humid tropics part 1 : Climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore. ASHRAE Transactions, 97 (2).
62. F. Simon, J M. Hauglustaine, C Baltes, S Liess. La fenêtre et la gestion de l'énergie. Constituants de la baie fenêtre : le vitrage pp 37-46 2001
63. Note d'information technique 214 du CSTC. Le verre et les produits verriers – Les fonctions des vitrages.
64. Serge Etienne- Les verres à couches. Laboratoire de Physique des Matériaux, UMRCNRS 7756, Nancy. Pôle Verrier/Cerfay, février 2009
65. Juliette Ruchmann. Les vitrages. Laissez entrer la lumière. La chimie et l'habitat 193 pp 194-205
66. Ludovic Ferry. Des films électrochromes actifs dans la proche infrarouge. Matériaux et chimie du 27/08/2013

67. Georges B. Hanna, Nabil M. Gurgius and Ali A. Aziz. Building Energy code for new residential buildings in Egypt
68. Chiheb Bouden. Influence of glass curtain walls on the building thermal energy consumption under Tunisian climatic conditions: The case of administrative buildings? Renewable energy 32(2007) pp 141-156
69. AAMSA Fenestration (Association of architectural aluminum manufacturers of South Africa. Selection of glazing materials. Introduction energy efficiency in fenestration/ August 2012
70. Ola Uduku. Modernist architecture and 'the tropical' in West Africa ; The tropical architecture movement in West Africa, 1948-1970. Habitat International 30 (2006) 396-411
71. Z. Yang, X.H. Li and Y.F. Hu. Study on solar radiation and energy efficiency of building glass system. Applied Thermal Engineering 26 (2006) 956-961
72. Saridar S, el Kadi H. The influence of applying recent facades technology on day lighting performance in buildings in eastern Mediterranean, Building environment 2002 ; 37 : 1205-12
73. Faggembau D, Costa M, Soria M, Oliva a. Numerical analysis of the thermal behavior of glazed ventilated facades in Mediterranean climates. Part II: applications and analysis of results. Solar energy 2003; 75: 229-39
74. Manz H. Total Energy transmittance of glass double facades with convection. Energy Buildings 2004; 36:127-36

75. Règlements thermique et énergétique des bâtiments neufs en Tunisie. Guide pratique de conception de logements économes en énergie. ANME. Décembre 2004
76. Givoni, B (1994) : Passive and low energy cooling of buildings. Van Nostrand Reinhold, New York
77. Note d'information technique 214 du CSTC. Le verre et les produits verriers – Les fonctions des vitrages.
78. Jacques Claessens, Yézouma Coulibally et autres. Efficacité énergétique de la climatisation active en région tropicale. Tomes 1 et 2. ISBN 2-89481-01261
79. Magali : Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique. Thèse de doctorat, Université de Louvain, faculté des sciences appliquées, Avril 2002
80. Costic, EDF, FNB, climatisation et développement, Guide technique de la climatisation
81. DANIDA, Development Advisory Group, Concevoir avec la nature, Guide de planification et de conception active sous climat chaud sec ou chaud humide, 1999
82. AFME, Guide d'aide à la conception de bâtiments climatiques aux Antilles, 1989
83. Passivhaus Institut, 2007, logiciel de conception de maison passive 2007- PPHPP 2007 – Exigences relatives à la certification de maisons passives. 201p.
84. Gentil Ingrid, Guilloux Gaël et Lacouture Cécile. Analyse de Cycle de Vie "Cradle to gate" d'un verre plat type float . Réf 623. Ed A du 19/07/2011 pp 1-31

85. PE International AG. Life Cycle Assessment of float glass. Novembre 2010
86. S. Blanchard, P. Reppe, Life Cycle analysis of a residential home in Michigan, Project Report for the M.Sc. degree in Natural Resources, University of Michigan, Center for Sustainable systems, 1998
87. C. Thomark, Low energy building in a life cycle; its embodied energy, energy need for operation and recycling potential, Building environment 37(2001) 429-435
88. T. Oka, M. Suzuki, T. Konnya, The estimation of energy consumption and amounts of pollutants due to construction of buildings, Energy and Buildings 19 (1993) 303-311
89. P. Winistirfer, Z. Chen, B. Lippke, N. Stevens, energy consumption and greenhouse gas emissions related to the use, maintenance, and disposal of a residential structure, Wood and fiber Science 37(2005)128-139
90. K. Adalberth, Energy use during the life Cycle of single-unit dwellings: a method, Building and Environment 32(4) (1997) 317-320
91. United States Environmental Protection Agency, Background document for life –Cycle. Greenhouse Gas emission Factors for clay Brick Reuse and concrete recycling/United States Environmental Protection Agency USA
92. 2004 http://epa.gov/climatechange/wycd/waste/downloads/claybrickandconcrete_11_07

ANNEXES

ANNEXE 1 : Evolution de la température ambiante, de l'humidité relative et du PMV a l'intérieur du bâtiment

- **Vitrage clair 4mm**

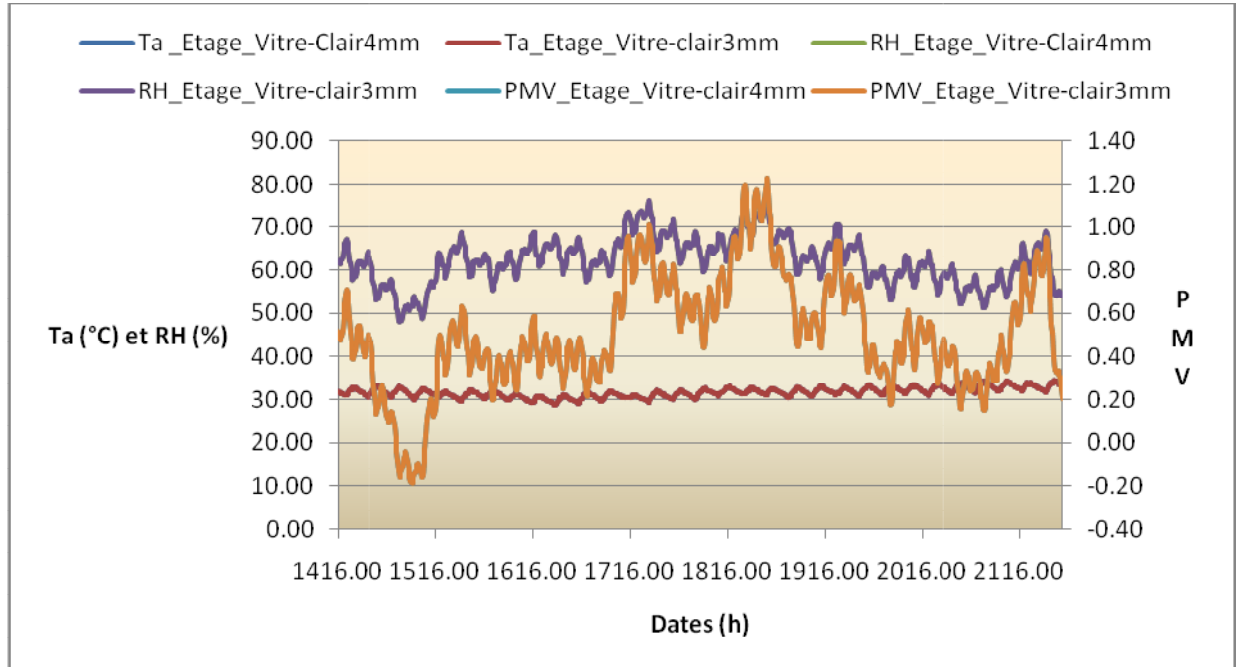


Figure 1 : Comparaison vitre float clair 3mm et le vitrage clair 4mm à l'étage

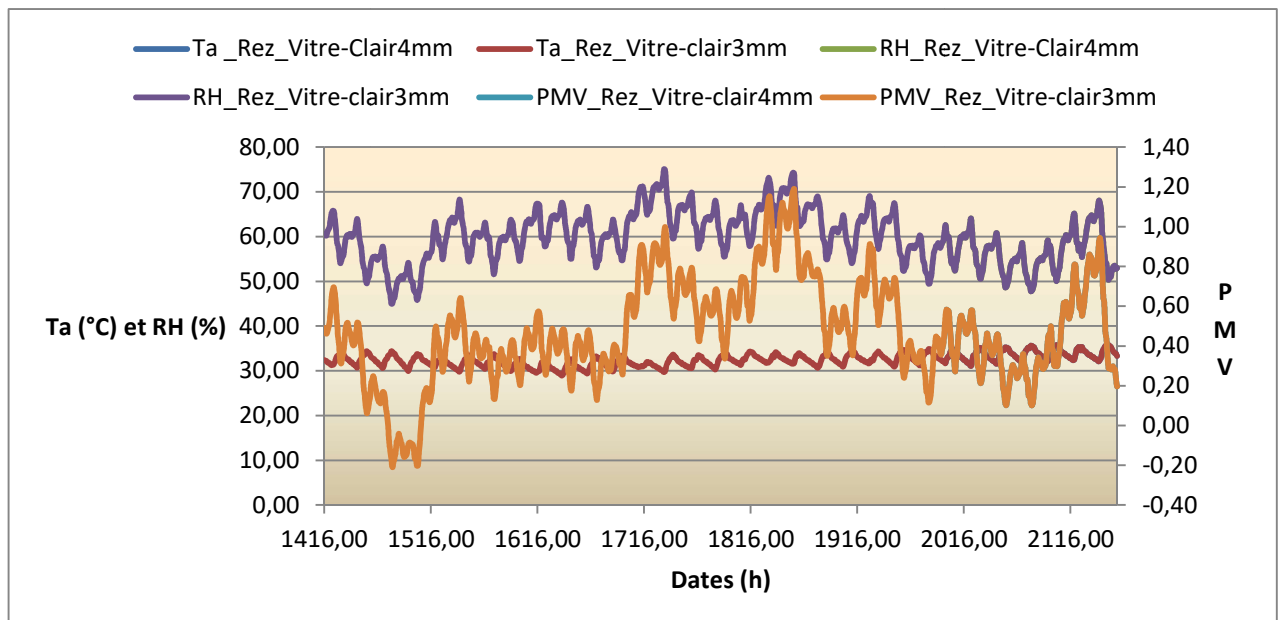


Figure 2: Comparaison vitre float clair 3mm et le vitrage clair 4mm au rez de chaussée

- **Vitrage clair float 5mm**

Les courbes suivantes illustrent les résultats de nos simulations avec le vitrage clair float 5mm. Les observations faites ici sont du même type que celles faites avec le vitrage clair 4mm et 3mm.

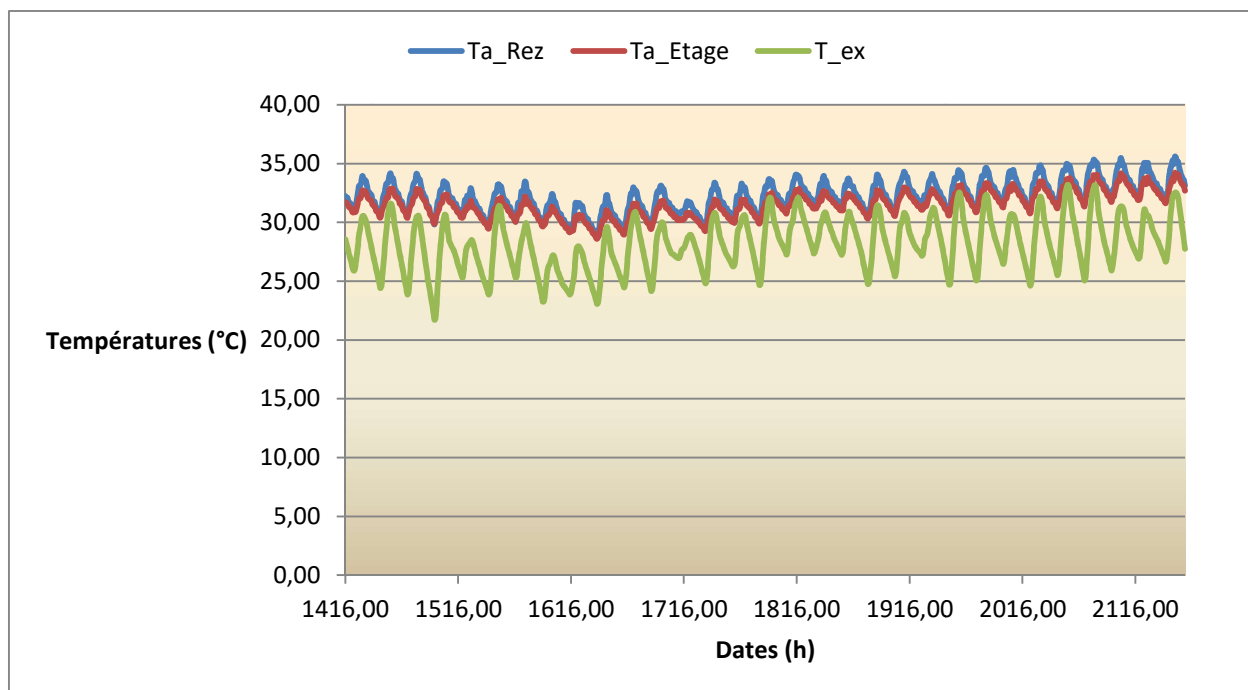


Figure 1: Evolution des températures

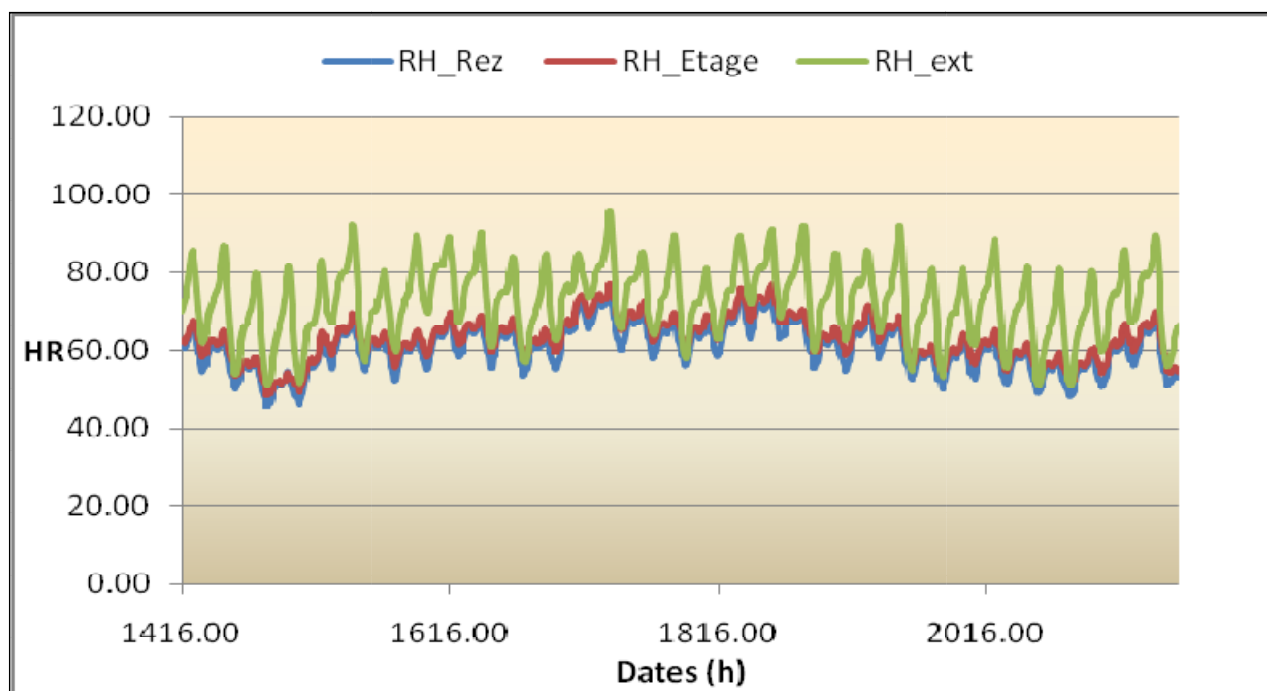


Figure 2 : Evolution des hygrométries

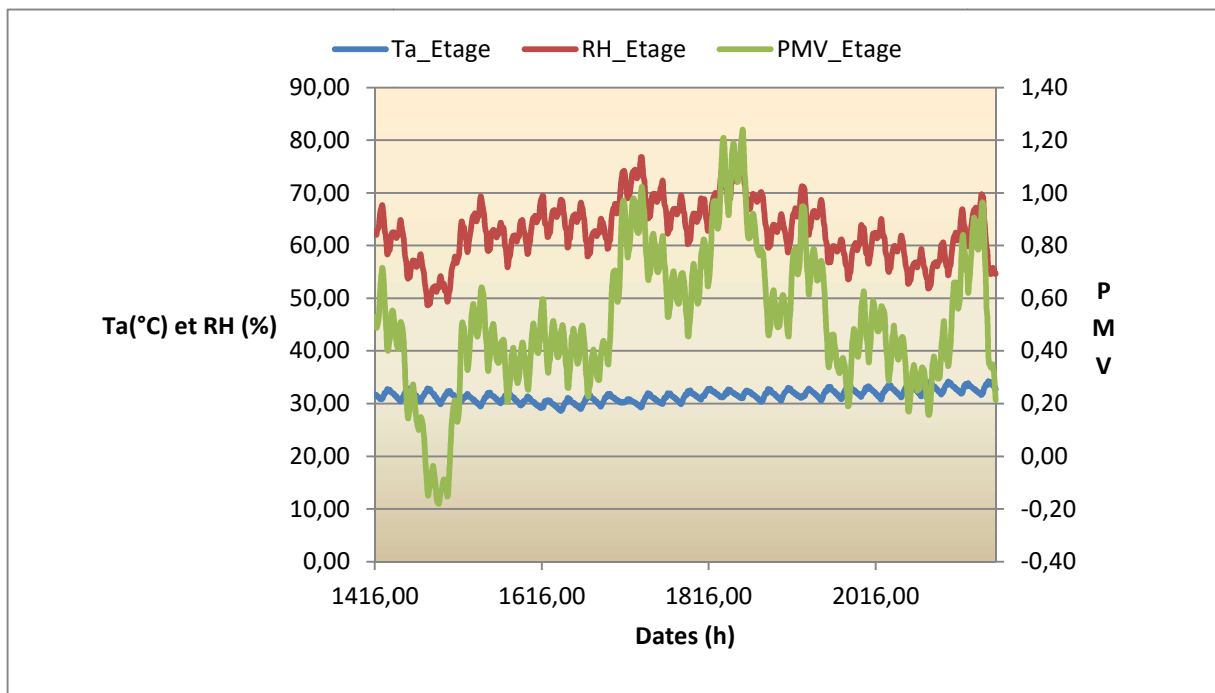


Figure 3 : PMV en fonction de Ta et RH (Etage) (float 5mm)

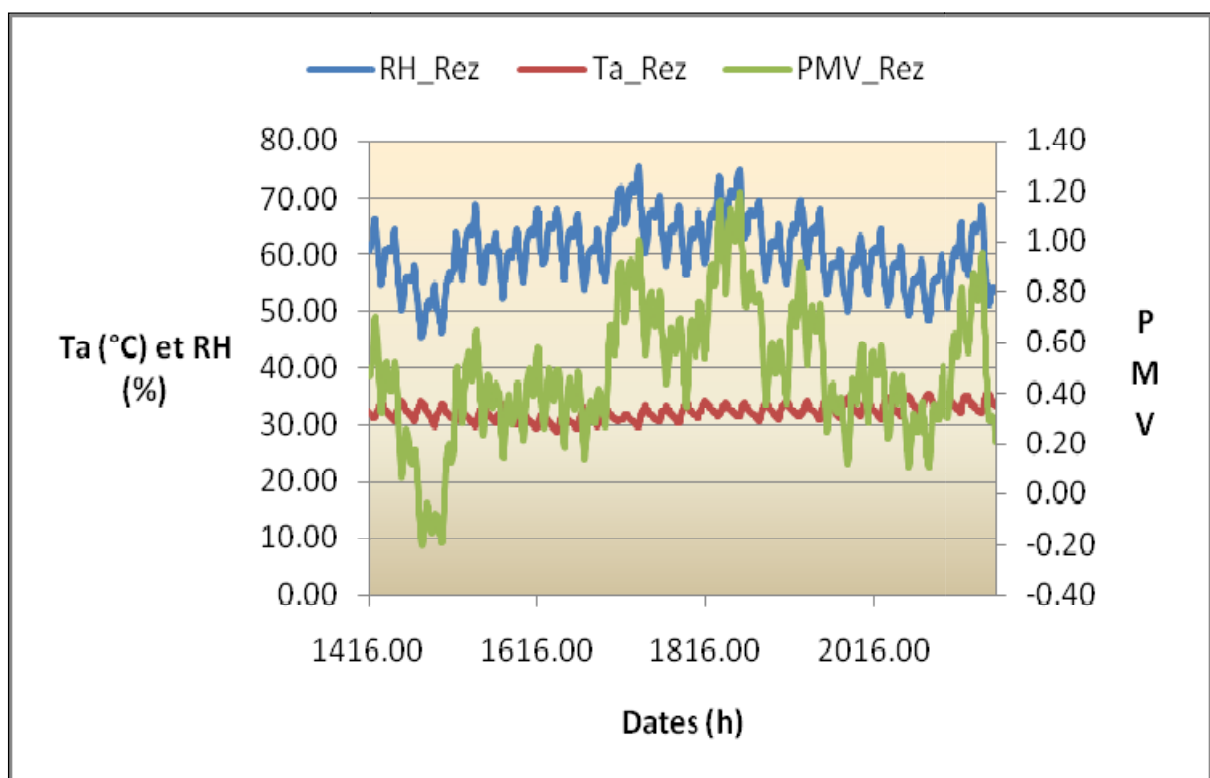


Figure 4 : PMV en fonction de Ta et RH (Rez) float 5mm

- **Vitrage float bleuté 4mm**

Les courbes suivantes illustrent les résultats de nos simulations avec le vitrage clair float bleuté 4mm. Les observations ici sont aussi pareilles.

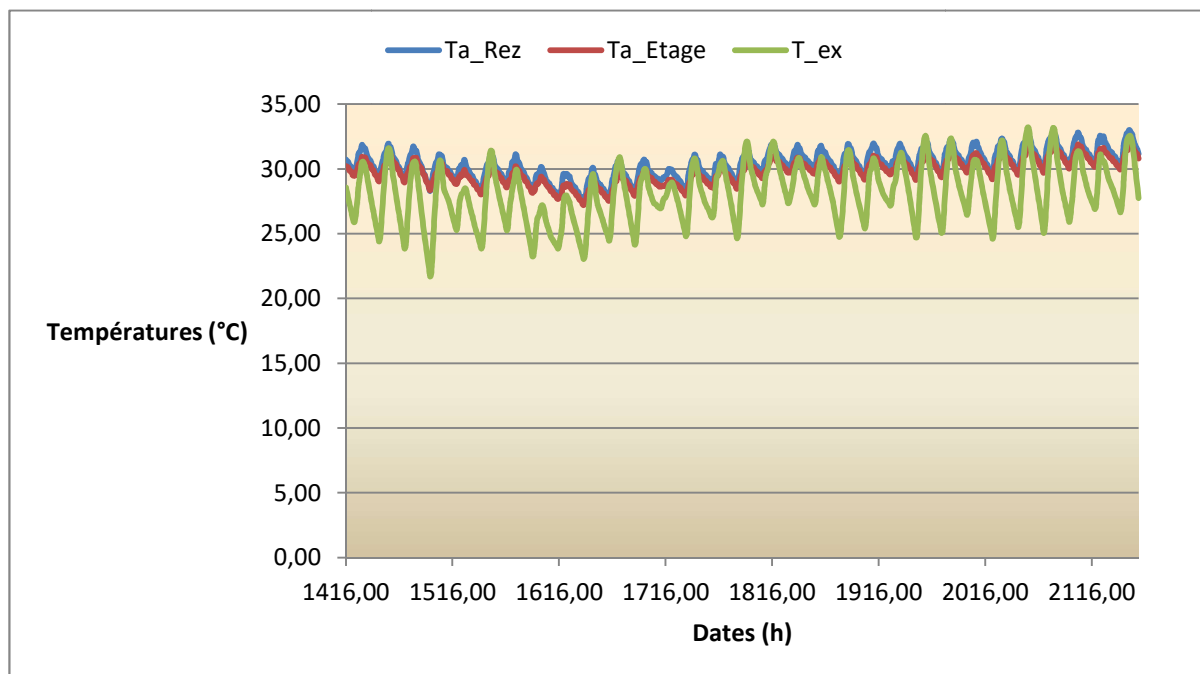


Figure 1 : Evolution des températures

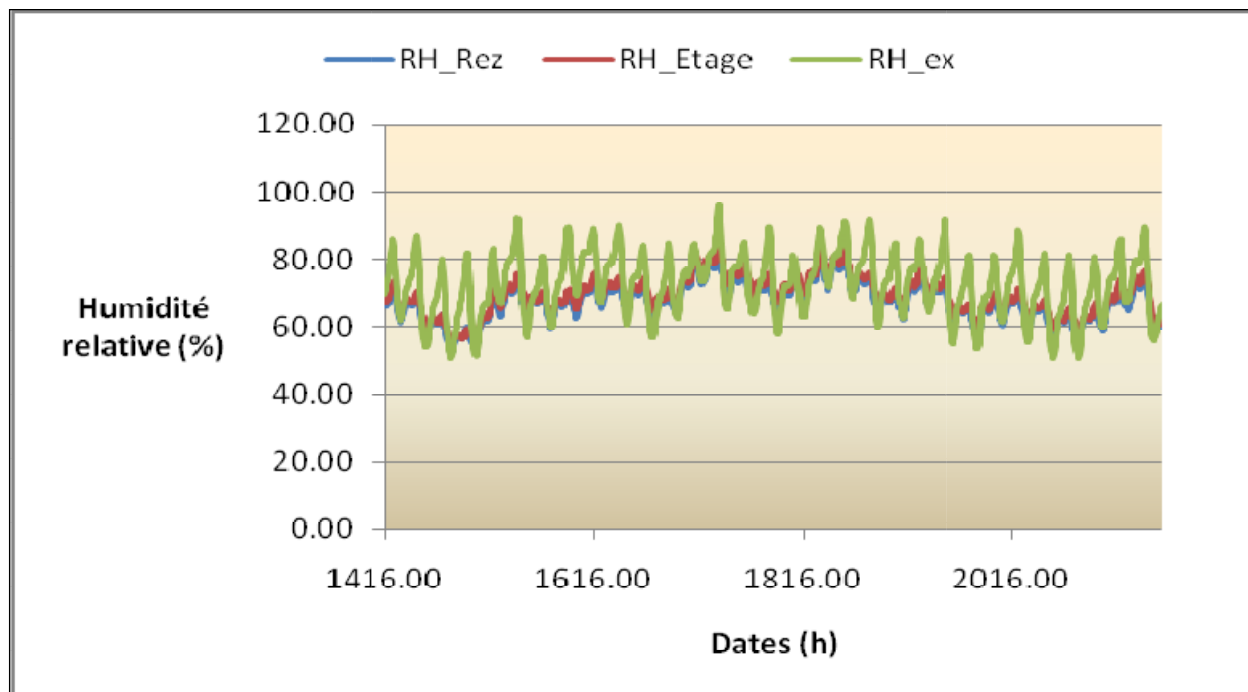


Figure 2 : Evolution des hygrométries

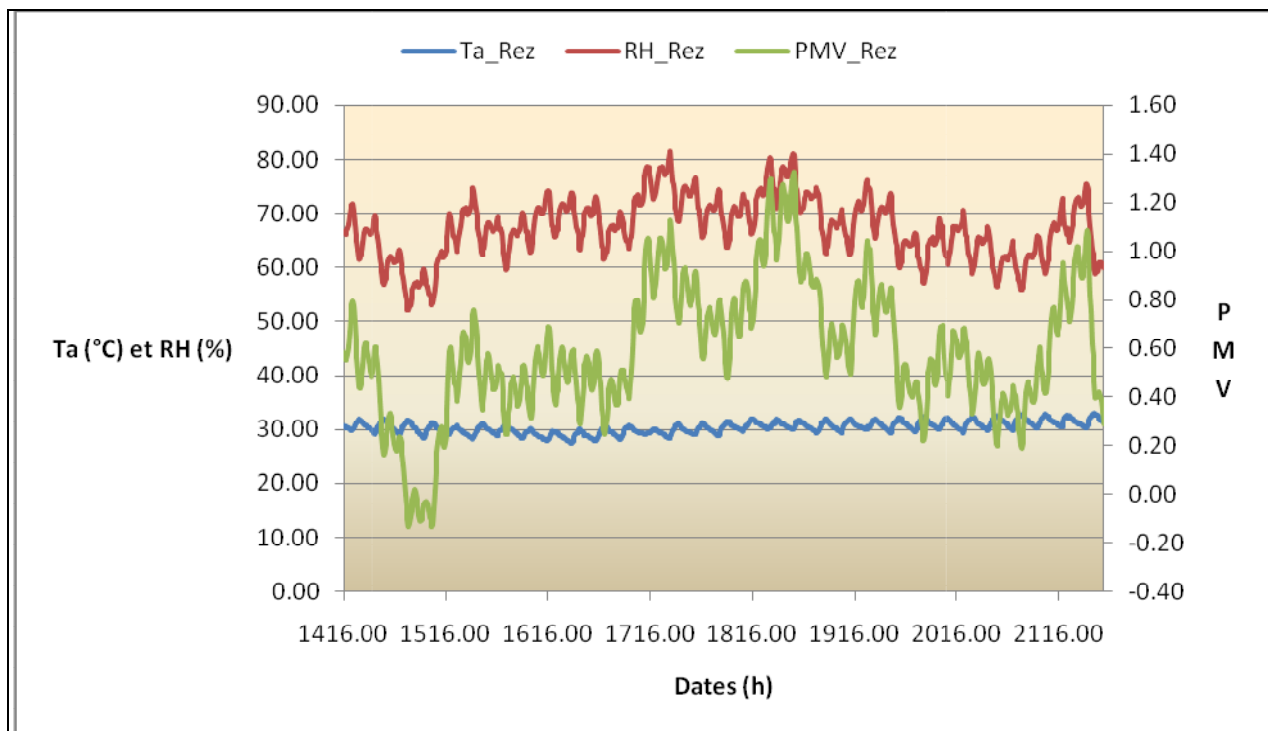


Figure 3 : PMV en fonction de Ta et RH (Rez)

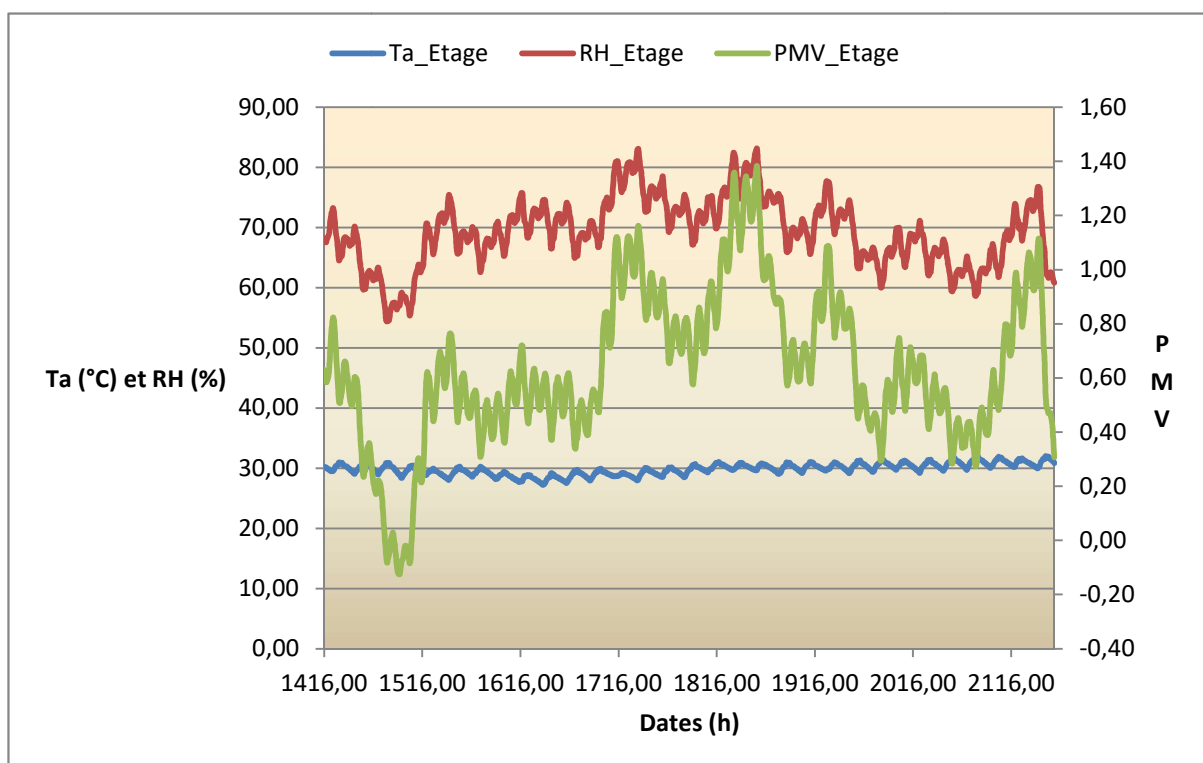


Figure 4 : PMV en fonction de Ta et RH (Etage)

- **Vitrage VAB float fumé**

Les résultats des simulations sont cette fois ci similaires aux résultats obtenus avec les vitrages déjà testés :

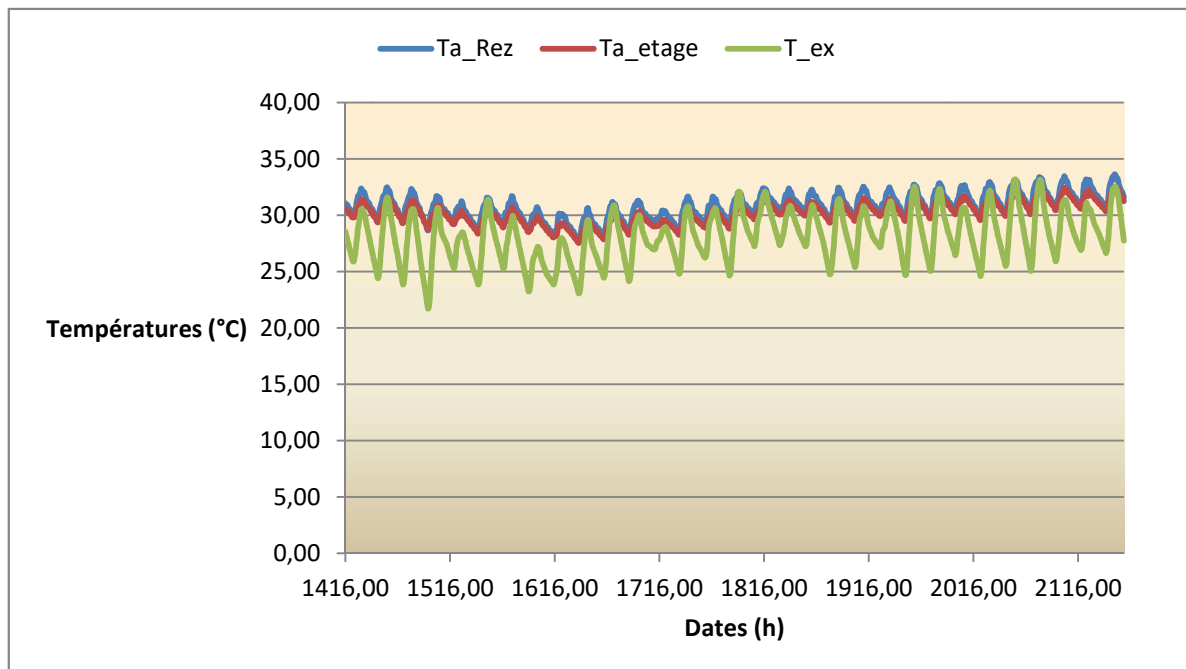


Figure 1: Evolution des températures

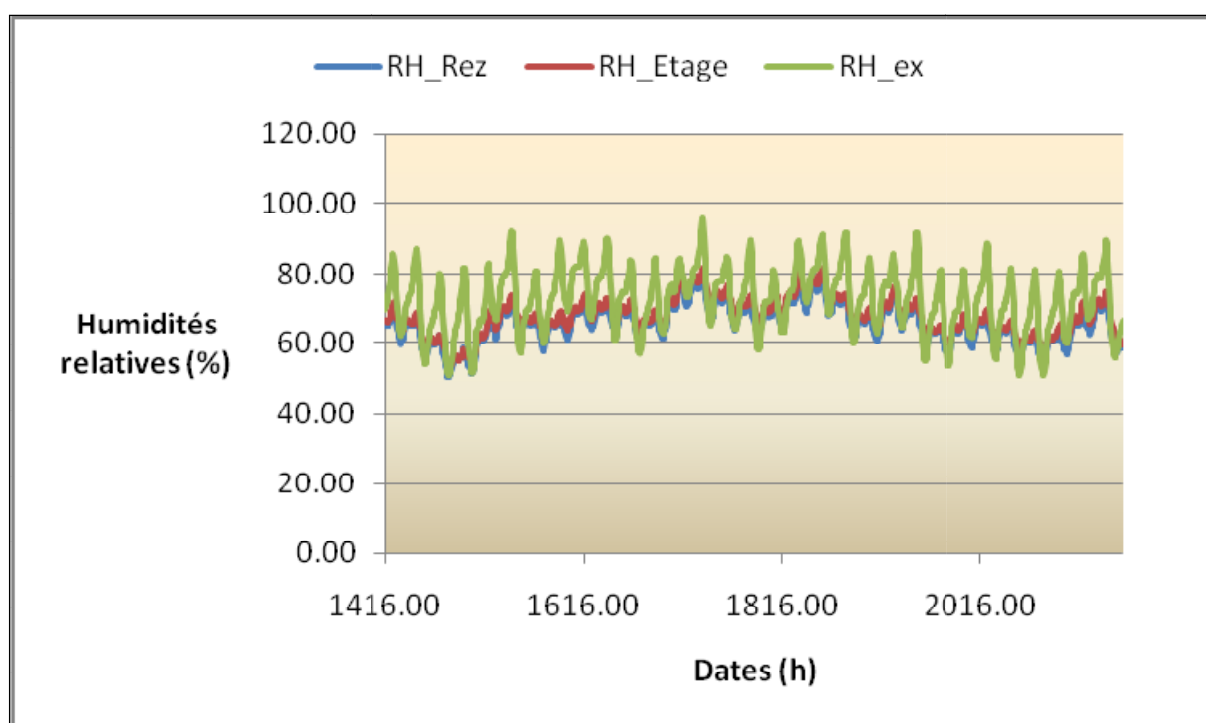


Figure 2 : Evolution des hygrométries

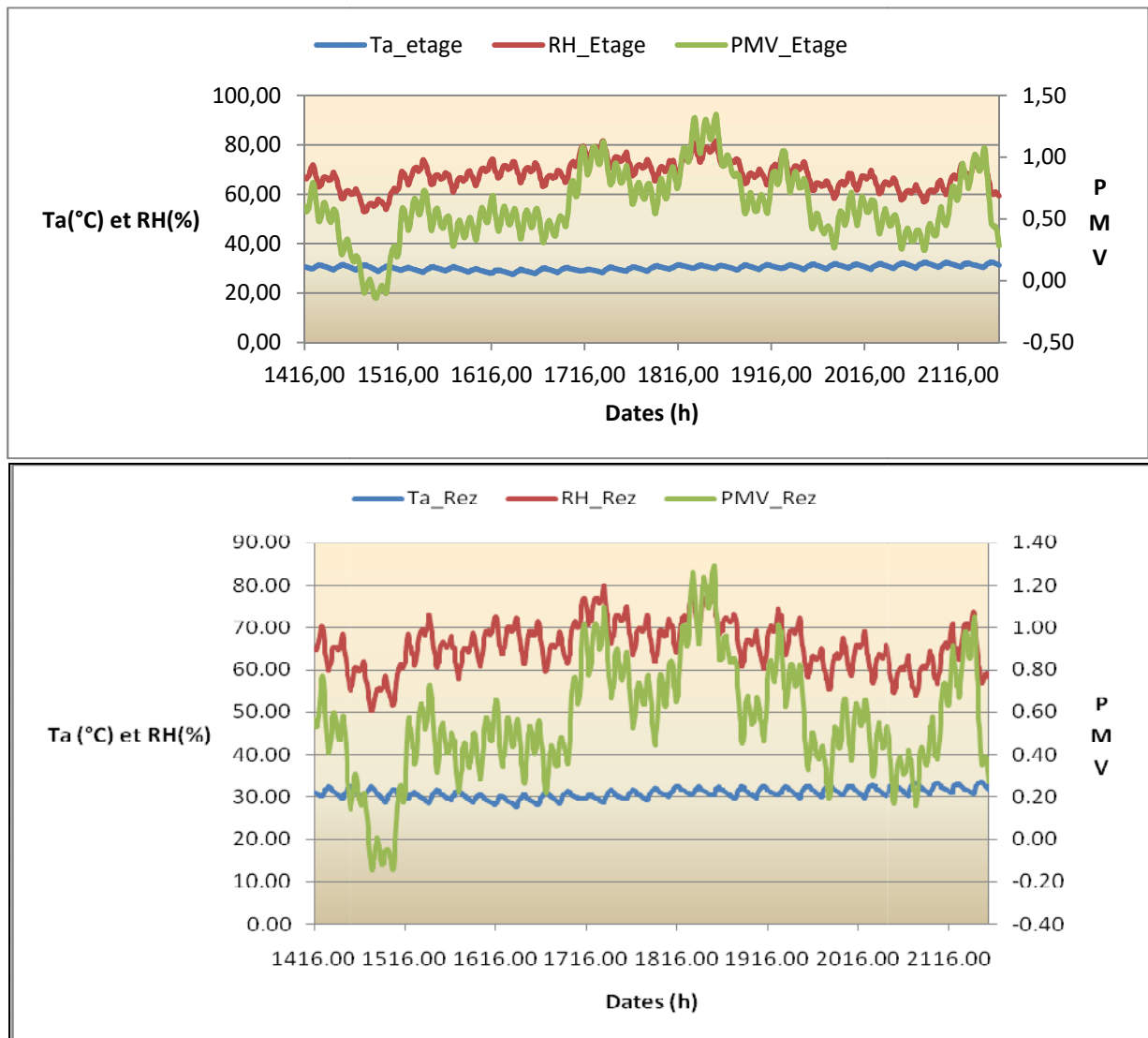


Figure 3 : PMV en fonction de Ta et RH (Rez)

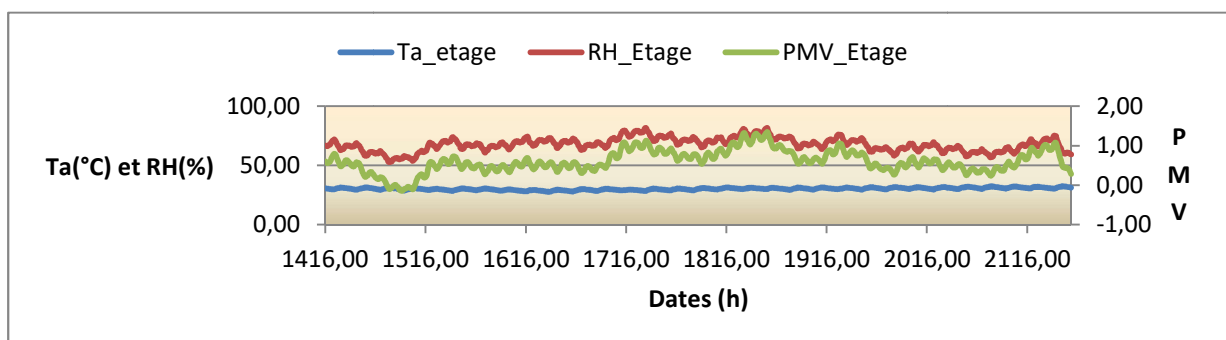


Figure 4: PMV en fonction de Ta et RH (Etage)

- **Climatisation active**

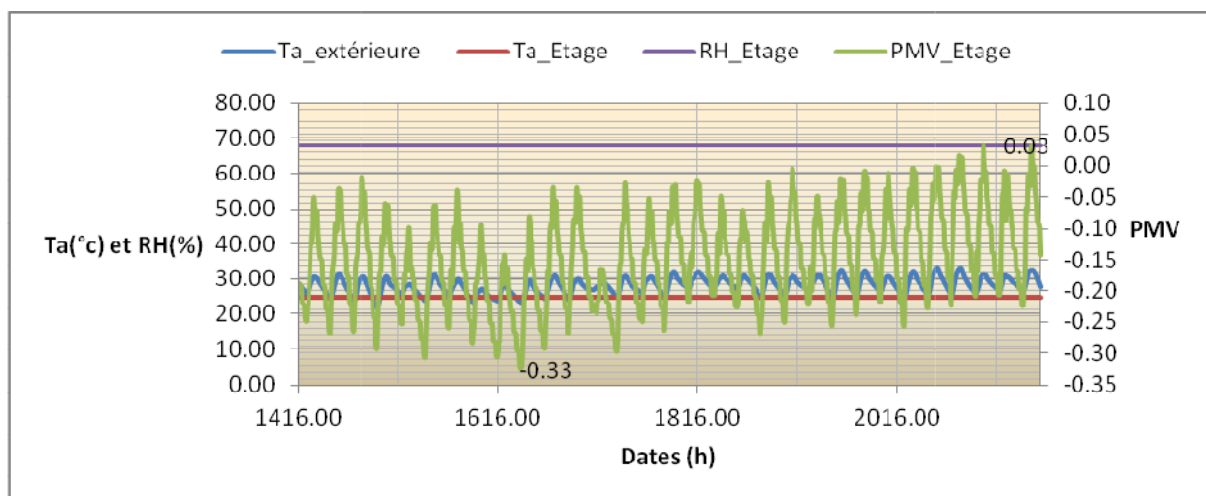


Figure 5A-1 : Evolution de la température, de l'humidité et du PMV à l'étage (Simple vitrage 4mm)

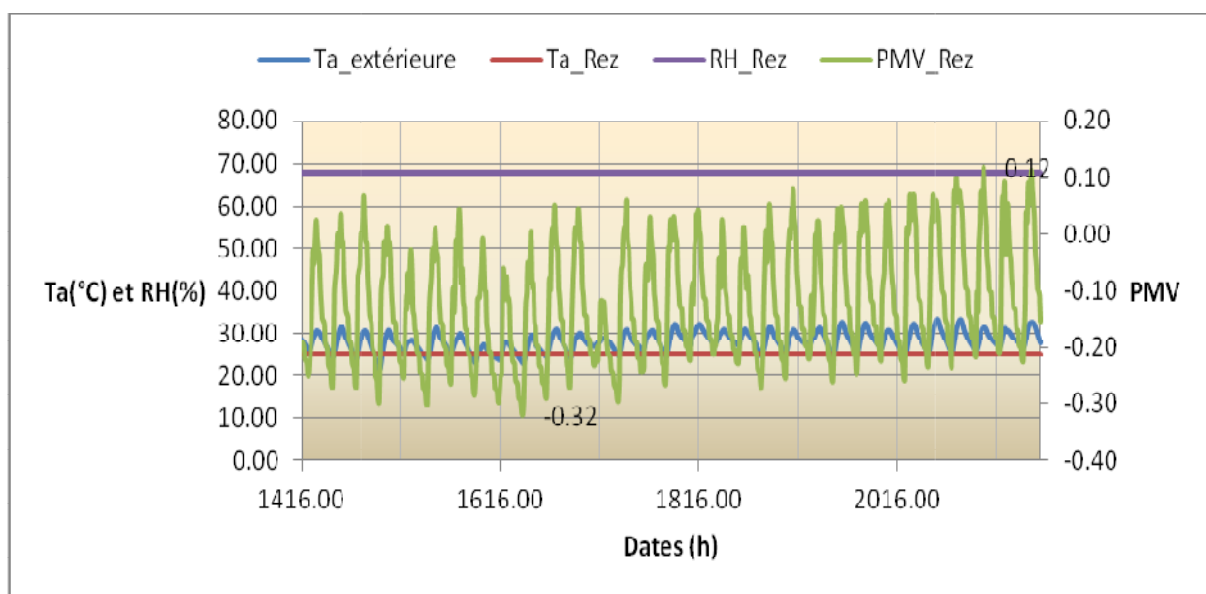


Figure 5A-2 : Evolution de la température, de l'humidité et du PMV au rez (Simple vitrage 4mm)

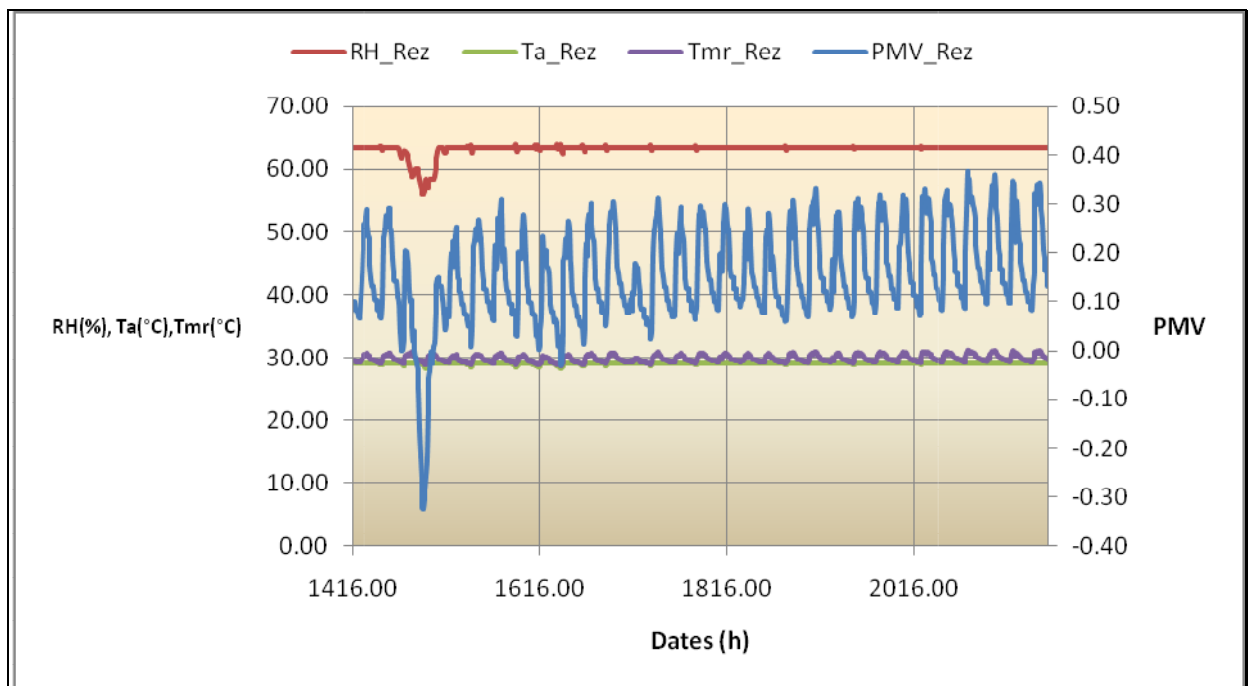


Figure 4-29 : Evolution de la température, de l'humidité et du PMV au Rez de chaussée (double vitrage4/16/4)

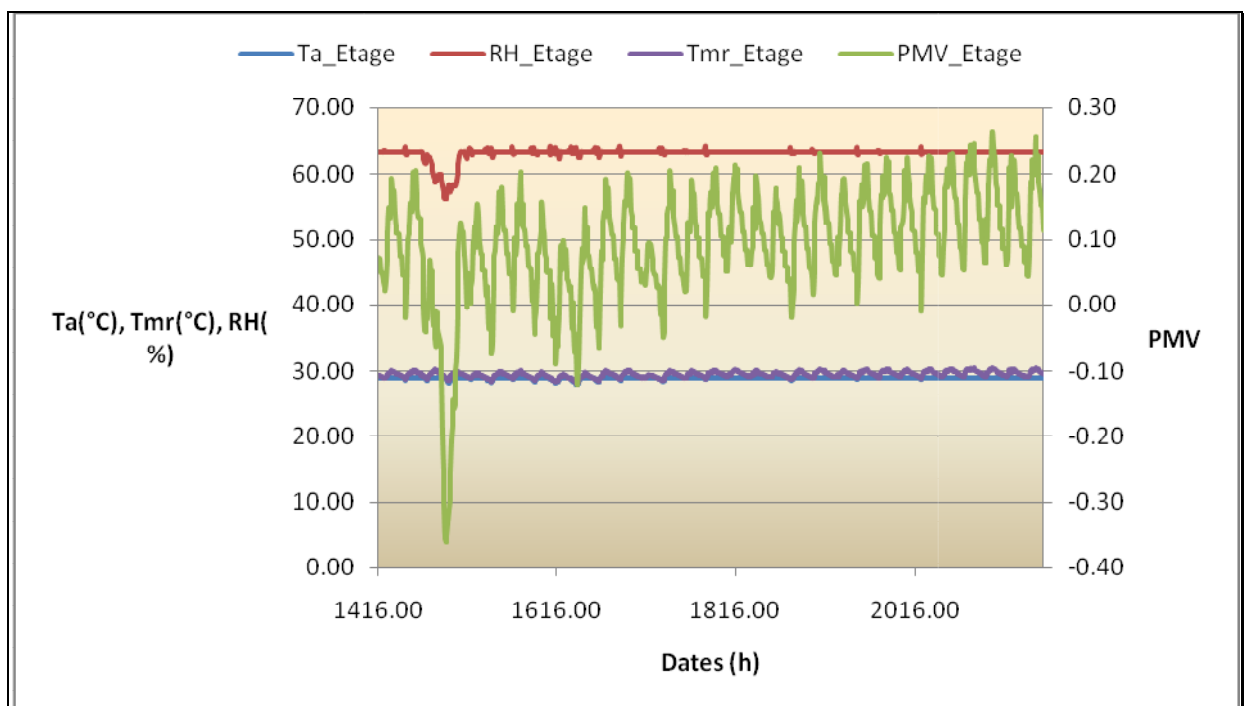


Figure 4-30 : Evolution de la température, de l'humidité et du PMV à l'Etage (double vitrage 4/16/4)

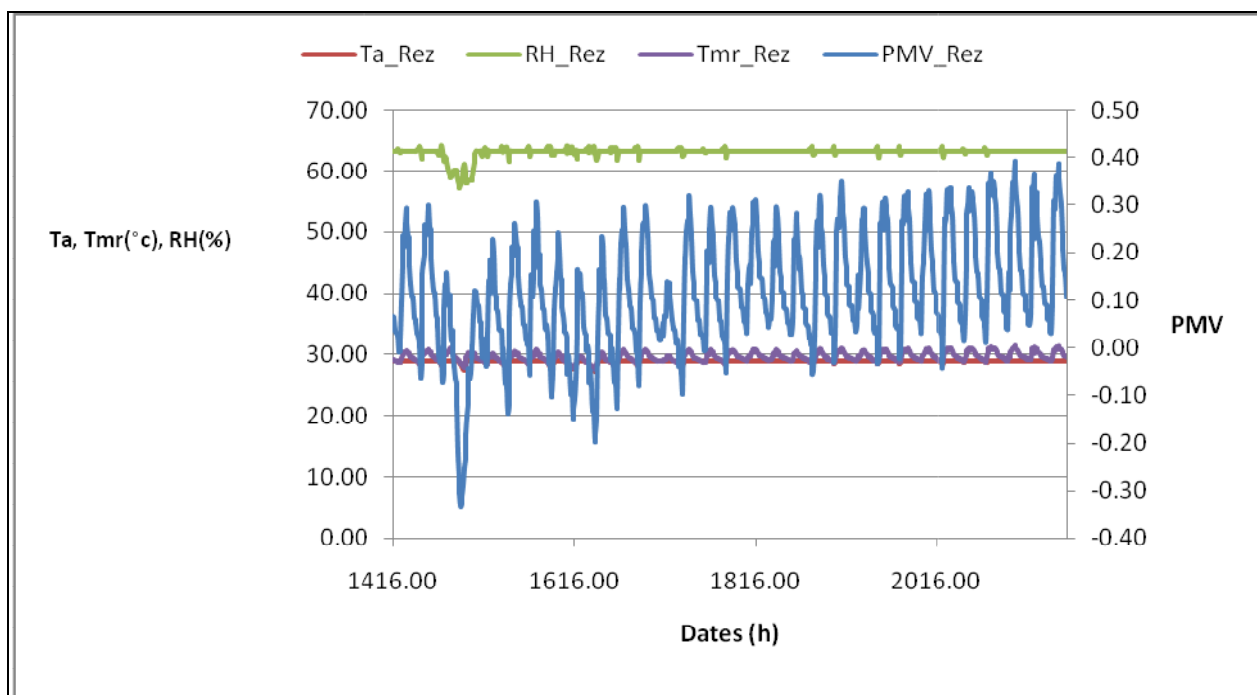


Figure 4-30 : Evolution de la température, de l'humidité et du PMV au Rez de chaussée (Simple vitrage float clair 3mm)

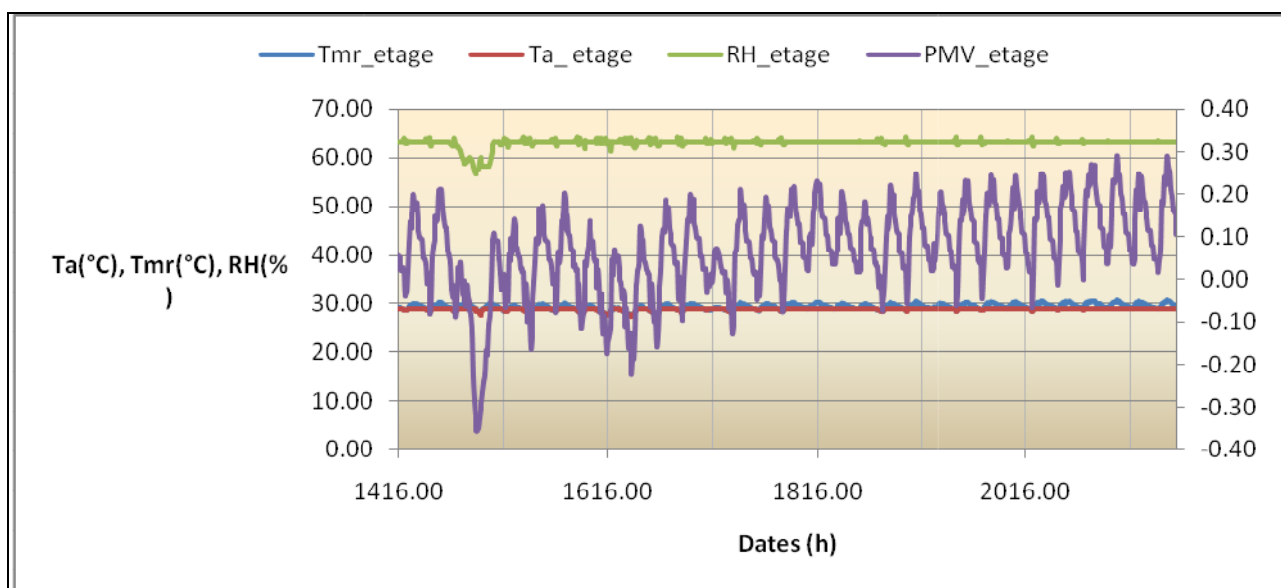


Figure 4-30 : Evolution de la température, de l'humidité et du PMV à l'étage (Simple vitrage float clair 3mm)

ANNEXE III: Déclarations Environnementales

®

CLIMAPLUS

SGG PLANILUX SGG PLANITHERM & SGG COOL-LITE

Double vitrage à basse émissivité

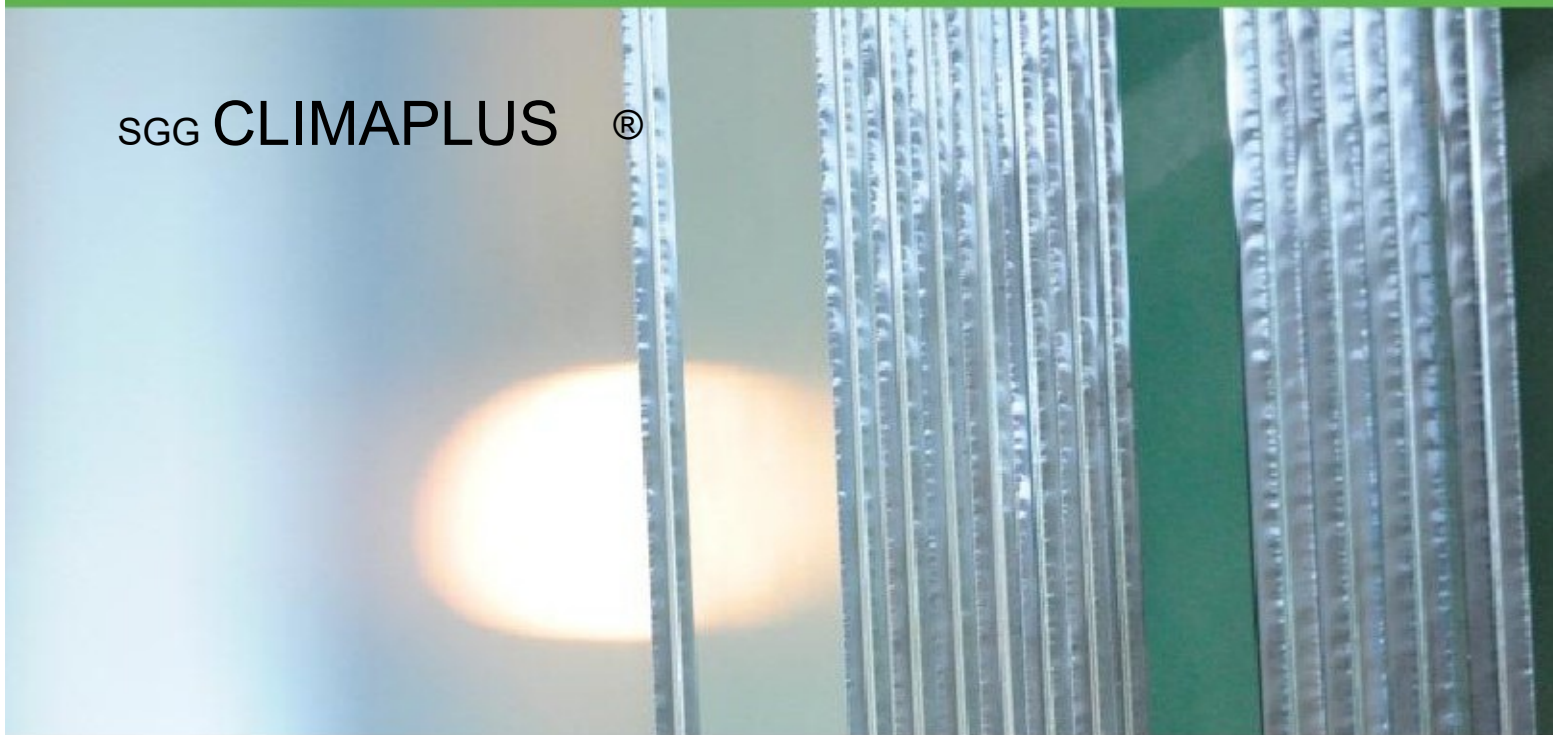
Autres configurations analysées :

4-12-4 mm
6-16-6 mm
6-15-4 mm

Environnementale & Sanitaire (FDES)

En conformité avec les standards internationaux ISO 14025, ISO 14040 & ISO 14044
et la norme française NF P01 010

SGG CLIMAPLUS[®]



1. Origine des données

Les informations contenues dans cette déclaration sont fournies sous la responsabilité de SAINT-GOBAIN GLASS selon la norme NF P 01-010 § 4.6

Contact : sustainable.glass@saint-gobain.com

2. Caractérisation du produit selon NF P 01-010§ 4.3

2.1 Définition de l'Unité Fonctionnelle (UF)

1m² de double vitrage destiné à être intégré dans une menuiserie pour un bâtiment pendant une annuité, sur la base d'une Durée de Vie Typique de 30ans. Les impacts de la menuiserie ne sont pas traités

2.2 Masses et données de base pour le calcul de l'unité fonctionnelle (UF)

Produit (nature et quantité pour la configuration de référence 4-16-4 mm)

Le double vitrage considéré est représentatif de la gamme SGG CLIMAPLUS ; il est composé de 2verres SGG PLANILUX et SGG PLANITHERM (verre revêtu d'une couche à faible émissivité). L'épaisseur nominale des feuilles de verre est 4mm ; l'épaisseur réelle est 3,85mm, en conformité avec la norme EN 572-2.

Les deux feuilles de verre sont séparées par un espaceur de 16mm d'épaisseur, en aluminium ou en composite (aussi appelé « warm-edge », pour une meilleure isolation thermique au bord du vitrage). L'espaceur nominal des feuilles de verre est rempli d'argon. L'assemblage est scellé avec du butyl et des mastics polyuréthane ou polysulfure qui assurent l'étanchéité périphérique.

La masse du double vitrage complet rapportée à une annuité est de 0,671kg (20,12 kg sur la DVT). Cette masse inclut les masses des deux feuilles de verre et des accessoires d'assemblage.

Le flux de référence de l'unité fonctionnelle est égal à 0.671kg sur une annuité et à 20,12 kg sur la DVT de 30ans.

Emballage de Distribution (nature et quantité) ; pour 1m² de double vitrage :

- Métal : 6,33 E-5 kg (0.0019 kg sur toute la DVT) ;
- Carton d'emballage : 3,9 E-4kg (0,0117 kg sur toute la DVT) ;
- Poudre intercalaire : 1,67 E-5 kg (0,0005 kg sur toute la DVT) ;
- Matières plastiques (attaches polyéthylène et polystyrène, boucles et sacs en polypropylène) : 7,67E-4kg (0.023 kg sur toute la DVT) ;
- Bois : 1,17 E-3 kg (0,035 kg sur toute la DVT).

Accessoires de pose : non pris en compte car plusieurs mode de mise en œuvre sont possibles : fenêtre à cadre PVC, bois, aluminium.... Ceci conformément à NF P 01 – 010 chap, 4.3 c.

Taux de chute : Il n'y a pas de taux de chute lié à l'intégration dans la menuiserie ou sur le bâtiment car il n'y a pas de découpe à faire sur chantier, les doubles vitrages étant livrés aux dimensions finales.

Vie en œuvre : Un entretien est pris en compte : 0,2 litre de solution de nettoyage utilisé par m² de vitrage et par an.

Justification des informations fournies proviennent des 10sites européens de production de verre SGG PLANILUX , de 6 sites européens de production de verre SGG PLANITHERM (SAINT GOBAIN GLASS) et d'un panel de sites français de GLASSOLUTIONS pour l'assemblage en double vitrage (représentatifs des autres sites européens de GLASSOLUTIONS).

2.3 Caractéristiques techniques utiles non contenues dans la définition de l'unité fonctionnelle

Le coefficient de transmission thermique Ug du produit est de 1.0W/(m².K) ou 1.1W/(m².K), pour une transmission lumineuse TL comprise entre 71% et 80% et un facteur solaire (g) compris entre 40% et 64%. Le produit est conforme à la norme EN 1279-5

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle				
	Configuration	4-16-4	6-16-6	4-12-4	6-15-4	Unités
	Consommation ressources énergétiques					
	Energie primaire totale	16,1	21,5	15,3		MJ/UF
	Energie renouvelable	0,691	0,802	0,629		MJ/UF
	Energie non renouvelable	15,4	20,7	14,6		MJ/UF
	Energie procédé	15,2	20,4	14,5		MJ/UF
	Epuisement ressources (ADP)	0,00634	0,00850	0,00602	0,00728	kg éq Sb/UF
	Consommation d'eau totale	8,15	11,6	7,98	9,82	litre/UF
	Déchets solides					
	Déchets valorisés (total)	0,0365	0,0548	0,0363	0,047	kg/UF
	Déchets éliminés					
	Déchets dangereux	0,0127	0,0139	0,0107	0,0123	kg/UF
	Déchets non dangereux	0,0351	0,0353	0,0286	0,0320	kg/UF
	Déchets inertes	0,672	1,00	0,666	0,834	kg/UF
	Déchets radioactifs	6,08 E-05	8,02 E-05	5,80 E-05	6,93 E-05	kg/UF
	Changement climatique	1,05	1,44	1,00	1,23	Kg éq CO2/UF
	Acidification atmosphérique	0,00677	0,00944	0,00655	0,00802	Kg éq SO2/UF
	Pollution de l'air	133	175	125	150	m³/UF
	Pollution de l'eau	0,326	0,432	0,310	0,372	m³/UF
	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	1,13E-11	1,55 E-11	1,13 E-11	1,34 E-11	kg éq R11/UF
	Formation d'ozone photochimique	0,000350	0,000450	0,000331	0,000392	kg éq éthylène/UF
Autre indicateur (hors norme NF P 01- 010)						
	Eutrophisation de l'eau					

	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour toute la DVT				
	Consommation ressources énergétiques					
	Energie primaire totale	484	645	458	553	MJ
	Energie renouvelable	20,7	24,1	18,9	21,5	MJ
	Energie non renouvelable	463	621	439	532	MJ
	Energie procédé	457	613	434	525	MJ
	Epuisement ressources (ADP)	0,190	0,255	0,181	0,218	Kg éq Sb
	Consommation d'eau totale	244	348	239	295	litre
	Déchets solides					
	Déchets valorisés (total)	1.095	1.644	1.000	1.39	kg
	Déchets éliminés					
	Déchets dangereux	0.381	0.417	0.322	0.370	kg
	Déchets non dangereux	1.05	1.06	0.857	0.959	kg
	Déchets inertes	20,1	30,1	20,0	25,0	kg
	Déchets radioactifs	0.00182	0.00241	0,00174	0,00208	kg
	Changement climatique	31.4	43.1	30.1	36.8	kg éq CO2
	Acidification atmosphérique	0.203	0.283	0.197	0.241	Kg éq SO2
	Pollution de l'air	3992	5244	3738	4503	m³
	Pollution de l'eau	9.78	13.0	9.31	11.2	m³
	Destruction de la couche	3.38E-10	4.64E-10	3.38E-10	4.02E-10	kgCFCéqR11

	d'ozone stratosphérique					
	Formation d'ozone photochimique	0.0105	0.0135	0.00993	0.0117	Kg éq éthylène
Autre indicateur (hors norme NF P 01- 010)						
	Eutrophisation de l'eau	14.1	20.5	14.1	17.3	G éq PO_4^{3-}

Product	
product	Flat glass(average from SGG PLANILUX, SGG PLANITHERM & SGG COOL-LITE

Product Category Rules: NF P 01-010	
Functional Unit	1m ² of SGG PLANILUX/PLANITHERM/COOL-LITE (average) glass 4mm thick
Geographical representativeness	European production sites
Reference service Life	30years
Additional components	Not considered. Several configurations are possible
Material losses	Not considered.
End of life	5% is recycled. The rest is landfilled

Environmental impacts relevant for construction products in accordance with ISO 14040, ISO 14025 and NF P 01-010§6

Environmental Impact	Units	Value for the Reference Service Value
Consumption of energy resources		
Total Primary Energy	MJ	162
Renewable Energy	MJ	3.84
Non Renewable Energy	MJ	158
Depletion of Natural Resources	kg of antimony (Sb) eq	0.0648
Water consumption	liter	103
Solid waste Disposed waste		
Hazardous waste	kg	0.044
Non – hazardous waste	kg	0.005915
Inert waste	kg	0.496
Radioactive waste	kg	0.00053
Climatic change	kg of CO ₂ eq	11.5
Atmospheric acidification	kg of SO ₂ eq	0.077
Air pollution	m ³	1302
Water pollution	m ³	5.65
Stratospheric Ozone Depletion	kg CFC eq. R11	1.23 E -10
Formation of photochemical smog	kg of ethylene eq.	0.00257
Eutrophication	G eq PO ₄ ²⁻	6.22